



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA LA
POTABILIZACIÓN DE AGUA LLUVIA PARA USO
DOMÉSTICO EN ZONAS RURALES DE COLOMBIA**

Sara Catalina Cure Zapata

William Felipe Gómez Ortega

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela ambiental,
Especialización en manejo y gestión del agua

Medellín, Colombia

2020



Análisis de alternativas para la potabilización de agua lluvia para uso doméstico en zonas rurales de Colombia

Sara Catalina Cure Zapata
William Felipe Gómez Ortega

Trabajo de monografía presentado como requisito parcial para optar al título de:
Especialista en manejo y gestión del agua

Asesor (a):

Maria Carolina Vélez Naranjo – Bióloga, M.Sc. en Biología

Línea de Investigación:

Gestión del recurso hídrico y manejo del agua

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería, Escuela Ambiental, Especialización en manejo y gestión del agua

Medellín, Colombia

2020

ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS PARA LA POTABILIZACIÓN DE AGUA LLUVIA PARA USO DOMÉSTICO EN ZONAS RURALES DE COLOMBIA

Resumen:

El potencial del agua lluvia como fuente abastecedora de agua potable está siendo estudiado alrededor del mundo. La falta de este recurso vital es una problemática que padecen hoy millones personas, y en Colombia la mayoría están ubicadas en las zonas rurales, debido a que son poblaciones dispersas y no cuentan con sistema de acueducto ni alcantarillado. Por esta razón, se analizan diferentes alternativas de tratamiento de agua lluvia que han sido desarrolladas tanto a nivel nacional como internacional, con el fin de evidenciar la posibilidad de adaptar dichas alternativas a las características de quienes requieren una fuente de agua potable. Para ello se tienen en cuenta los siguientes criterios de selección para identificar la alternativa que mejor se ajusta a las condiciones locativas y socioeconómicas: calidad del agua, precio, mantenimiento, manufactura y diseño ergonómico. Partiendo de los resultados se plantea como caso de estudio el municipio de Turbo, ubicado en Antioquia, donde la población sufre de escasez de agua en las épocas de sequía del año. En este caso se detalla la viabilidad del agua lluvia como solución a tal problemática y los beneficios que trae para la población.

Palabras clave:

Abastecimiento de agua en zonas rurales, aprovechamiento de agua lluvia, sistemas de potabilización de agua lluvia, sistemas rurales de abastecimiento de agua, uso potencial del agua lluvia.

1 INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso más abundante en el planeta Tierra, pero a pesar de su disponibilidad, un bajo porcentaje de este recurso cumple con las características necesarias para satisfacer las necesidades humanas. El 97,5% es agua salada y está presente en los océanos. El 2,5% restante es agua dulce y está en su mayoría contenida en los polos, quedando sólo el 0,3% de esta agua, con disponibilidad potencial para el uso humano, gracias a que proviene de fuentes superficiales como lagos y quebradas (Novak, DeBusk, & Van Giesen, 2014, p. 2) (Figura 1).

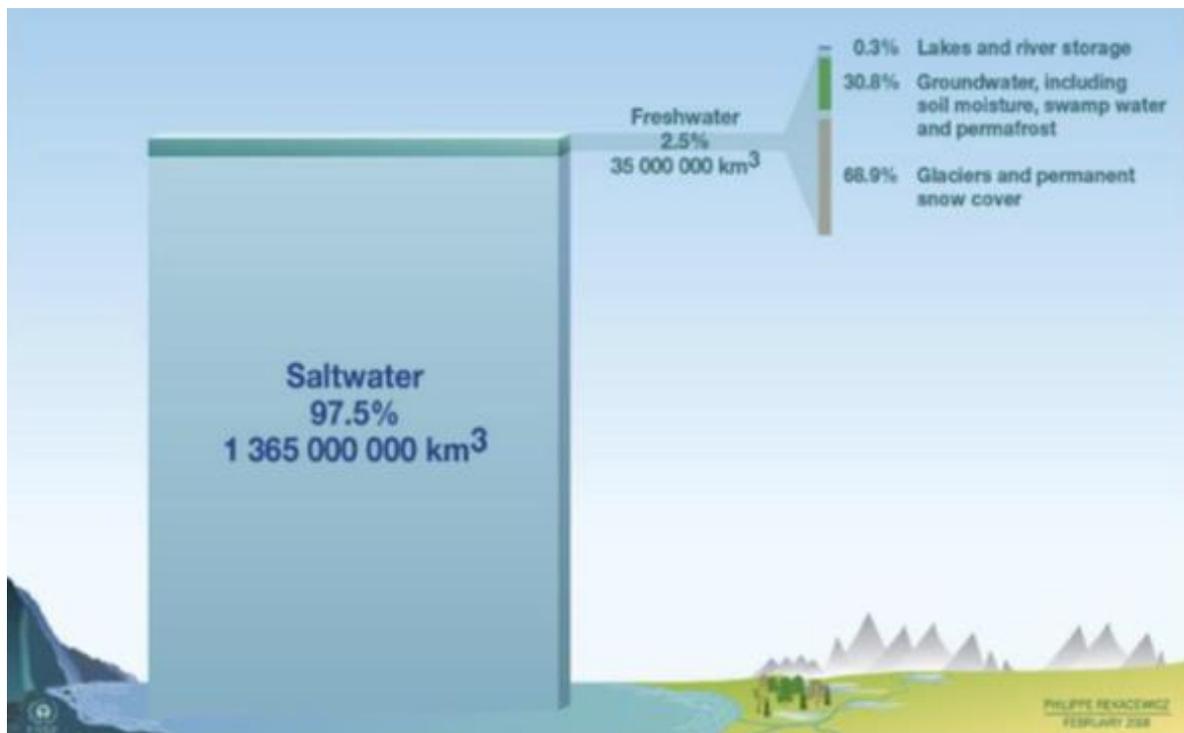


Figura 1. Disponibilidad de agua en el planeta tierra. Tomado de: Igor A. Shiklomanov, State Hydrological Institute (SHI, St. Petersburg) y United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO, París), 1999. Imagen cortesía de la UNEP.

Además de ser una porción pequeña de agua la que es viable para satisfacer las necesidades humanas, esta cantidad está disminuyendo debido a que el sistema hídrico natural está sufriendo diferentes vulnerabilidades (Sutorius & Rodríguez, 2015), como lo expresa el Sistema de Información del Recurso Hídrico -SIRH-:

- Disminución en la oferta hídrica por consecuencias en la variabilidad y el cambio climático.
- Disminución de la capacidad de regulación hídrica por pérdida de ecosistemas como humedales y páramos.
- Contaminación intrínseca por actividades antrópicas en fuentes superficiales y subterráneas.

Tal problemática ha sido motor de búsqueda de nuevas estrategias para acceder a fuentes de agua y alternativas para promover el uso eficiente de la misma, con el fin de abastecer las necesidades básicas y lograr procesos productivos con el menor gasto y disminuyendo los vertimientos contaminados. Una de estas alternativas es sin duda el uso del agua lluvia, ya que es

un recurso que tenemos a nuestra disposición y está llegando directo al desagüe junto con las aguas residuales, sin ser aprovechado en un uso concreto. Esta alternativa no es nueva, ya que la recolección de agua lluvia es una técnica de suministro de agua muy antigua y su valor radica en su disponibilidad, ya que permite en muchos casos eliminar las barreras de distribución de agua, generalmente en zonas rurales donde la mayoría de la población está dispersa.

En Colombia ésta problemática de distribución de agua e interconexión está latente, ya que aún el 26,8% de la población rural no cuenta con servicio de agua potable y saneamiento básico (Gobierno de Colombia, 2017); y no solo la población que no tiene acceso a una red de servicios públicos carece de agua potable, ya que, algunas comunidades en el país reciben agua pero no la pueden consumir directamente por su mala calidad. Esta situación causa la muerte de 1600 personas al año en el país, como lo indica el Banco Mundial en el informe *Notas de Política: Colombia* (2014). Los principales afectados son menores que fallecen por enfermedades en el sistema digestivo, causadas por malas condiciones del agua, y carencia de saneamiento básico e higiene. Esta insuficiencia de servicios públicos para la comunidad afirma que el acceso al agua potable y al saneamiento básico es un determinante social de la salud, mostrando la estratificación de equidad que se da entre las poblaciones, tal como se expresa en el Estudio Nacional del Agua (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2018).

Atendiendo la problemática mencionada y aprovechando el potencial de uso que tiene el agua lluvia como fuente de agua para suplir las necesidades básicas humanas, se estudian diferentes alternativas de tratamiento para contribuir con una solución viable, que permita a la población no interconectada de zonas rurales de Colombia, contar con acceso a agua potable de forma práctica y segura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Revisar sistemas de tratamiento de agua implementados para la potabilización de agua lluvia, que permitan el abastecimiento de agua potable en zonas rurales de Colombia de forma práctica y segura.

2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1 Documentar los sistemas de tratamiento de agua lluvia implementados con el propósito de su potabilización, a nivel nacional e internacional.
- 2.2.2 Analizar características como metodologías, técnicas y componentes de sistemas de tratamiento de agua lluvia implementados, de acuerdo con las necesidades, contexto y disponibilidad de recursos para su implementación en zonas rurales del país.
- 2.2.3 Identificar los sistemas de tratamiento de agua lluvia que permiten satisfacer la necesidad de agua potable latente en poblaciones de zonas rurales de Colombia que no están interconectadas.

3 METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este estudio se realizó una búsqueda avanzada de información, con la cual se documentaron y analizaron los sistemas de tratamiento de agua lluvia para su potabilización en diferentes zonas del mundo. A partir de este análisis de información se hace una valoración crítica para identificar cuáles alternativas pueden ser aplicadas en las zonas rurales de Colombia, en especial en el caso de estudio del municipio de Turbo, Antioquia. A continuación, se describe el paso a paso de la metodología implementada, teniendo en cuenta cada una de las etapas seguidas para el desarrollo de la investigación y el alcance de los objetivos propuestos:

3.1 Búsqueda de información

La revisión de los sistemas de tratamiento implementados en diferentes zonas del mundo partió de una búsqueda de información exhaustiva en la que se identificaron los sistemas de potabilización del agua lluvia implementados, tanto Colombia como en el mundo. Se consultaron artículos de investigación, tesis de grado, libros especializados en el tema y fuentes de información ambiental como estudios del IDEAM y otras autoridades ambientales de Colombia.

3.2. Clasificación de la información

Se clasificaron las fuentes consultadas respecto a los datos que desarrolla cada estudio, en cuanto a sistemas de tratamiento implementados, alcance de potabilización del agua lluvia, materiales utilizados y costos asociados.

3.3. Selección y análisis de la información

En esta actividad se identificó la siguiente información en las fuentes consultadas: zonas de captación, formas de almacenamiento y los sistemas de tratamiento, tanto de filtración como de desinfección utilizados para la potabilización del agua captada. A partir de lo anterior, se extrajo la información relevante y pertinente de acuerdo con el objetivo de estudio, para proceder con el análisis crítico de esta información, basada en conocimientos previos y en la concepción de los diferentes autores, teniendo en cuenta los aspectos más relevantes identificados en cada investigación.

3.4. Síntesis de la información

Con la información extraída de cada fuente bibliográfica, se realizó una jerarquización de la información a través del análisis de las ideas principales de los apartados de las fuentes seleccionadas. A continuación, se procedió con la toma de las ideas referentes a un mismo tema desde diferentes autores, para plantear un desarrollo preciso y global de éste, garantizando la coherencia y cohesión de los temas analizados dentro del texto.

3.5. Análisis de información sintetizada

Partiendo de la información seleccionada, el conocimiento técnico y el criterio ingenieril, se realizó un análisis con promedio ponderado de los sistemas de potabilización de agua lluvia presentados en la síntesis de información, en el cual se plantearon criterios importantes de evaluación y se asignó un puntaje de cumplimiento a cada alternativa de acuerdo con la argumentación técnica de los autores. De esta forma se identificó el método de tratamiento que mejor se ajusta a las condiciones socioeconómicas de la población rural del país.

3.6. Caso de estudio: Turbo Antioquia

La alternativa seleccionada se analiza dentro de la población del municipio de Turbo como caso de estudio, donde se contextualiza la problemática y se reconocen los beneficios que puede gozar la población al implementar el agua lluvia como fuente abastecedora de agua potable.

4 SISTEMAS DE APROVECHAMIENTO DE AGUA LLUVIA

La abundancia de agua lluvia en Colombia permite que esta sea una fuente potencial de abastecimiento en las zonas rurales donde no se cuenta con acueducto. El promedio de precipitación en Colombia es de 2.918 mm/año y la escorrentía es de 56,2 l/s.km² en términos de rendimiento promedio. Estos valores son muy superiores a los promedios mundiales, en especial el valor de la escorrentía, donde el promedio mundial es de 10 l/s.km² y el promedio latinoamericano es de 21 l/s.km² (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2018, p.44).

Además de la disponibilidad del agua lluvia, es importante tener en cuenta la calidad con la que es captada, ya que de esto depende su potencial para uso en consumo humano o para la realización de otras actividades cotidianas de las personas. La calidad de agua captada debe mejorarse implementando procesos físicos, químicos o biológicos como filtración, desinfección y otros tipos de tratamientos (Novak et al., 2014, p.3), que permitan el cumplimiento de los valores establecidos para los parámetros del agua que se destina al consumo humano en Colombia, estipulados en la resolución 2115 de 2007 (Ministerio de la Protección Social, 2007).

La calidad del agua lluvia captada depende de cada una de las partes que conforman el sistema de captación, el cual está compuesto por la recolección, que usualmente se hace a través de los techos y de canoas perimetrales de recolección; y por un tanque para el almacenamiento y el aprovechamiento del agua captada. Adicional a este proceso, recientemente se están implementando sistemas de tratamiento del agua, para mejorar su calidad y evitar la generación de vectores infecciosos.

Para atender a lo anterior, se analizan las especificaciones técnicas de cada una de las partes de los sistemas de agua lluvia mencionadas, tomadas de la Unidad de apoyo para el saneamiento básico del área rural, dadas por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente -CEPIS-. A continuación, se presentan las definiciones de los componentes mínimos con

los que debe contar un sistema de aprovechamiento y tratamiento de agua lluvia dirigido a viviendas de zonas rurales.

4.1 Captación

Se da en la superficie utilizada para la recolección de agua lluvia, la cual está representada por el techo de las viviendas como se observa en la *figura 2*. Es muy importante que los materiales con que están construidas estas superficies no alteren la calidad de agua captada o resten eficiencia en el tratamiento con aporte de contaminantes, además es fundamental conocer los coeficientes de escorrentía de los distintos materiales de los techos para obtener el mayor aprovechamiento posible (CEPIS, 2003).



Figura 2. Superficies de captación de agua lluvia. Tomado de: (Novak et al., 2014).

4.2 Recolección

Comprende el conjunto de canaletas ubicadas en todo el perímetro de la superficie de captación o recolección de agua lluvia (*figura 3*). En ella se deben tener en cuenta las mismas consideraciones establecidas para los materiales en la fase de captación. Es importante considerar durante el diseño y la instalación de estos sistemas, que la velocidad del agua no debe superar 1m/s (CEPIS, 2003, p.5).



Figura 3. Canales para la colección del agua lluvia captada. Tomado de: (CEPIS, 2003).

El material de las canaletas debe ser liviano, resistente al agua y fácil de unir entre sí, con el fin de reducir o mitigar las fugas de agua. Para el caso de las primeras aguas es necesario contar con un dispositivo de descarga, porque estas llevan consigo la contaminación del aire y de la superficie. (CEPIS, 2003, p.6). También se han realizado optimizaciones de diseño en cuanto a la retención de materiales de gran tamaño, ya que estos ocasionan la pérdida de eficiencia en la unidad de filtración por efectos de reducción de capacidad hidráulica, como los que se muestran en la *figura 4*:

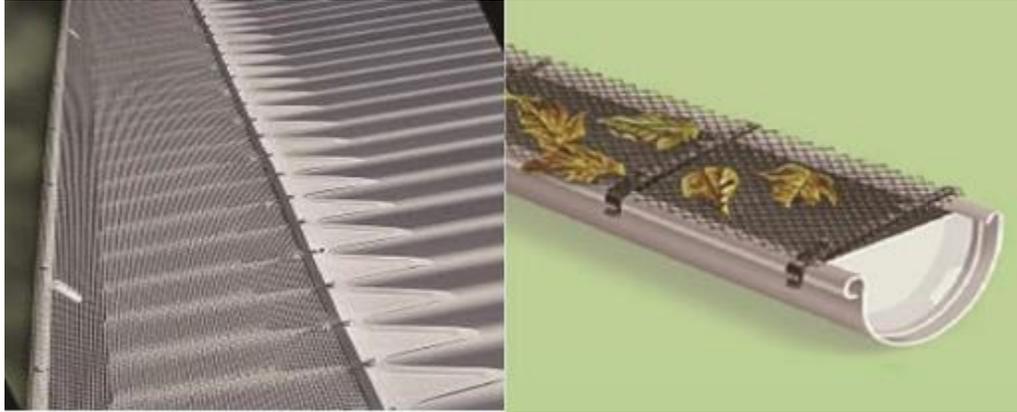


Figura 4. Mallas para sólidos de gran tamaño. *Tomado de:* (Perez Chavero, 2017, p.28)

4.3 Interceptor de primeras aguas

Corresponde al primer tanque de almacenamiento que tiene el sistema de tratamiento de agua lluvia (*figura 5*), el cual almacenará ese efluente originado por el lavado de la superficie de captación. Ahora bien, por las características físicas del efluente su aprovechamiento va dirigido para uso doméstico, por ejemplo, riego. En el diseño del dispositivo se debe tener en cuenta el volumen de agua requerido para lavar el techo y que se estima en 1 litro por m² de superficie de captación (CEPIS, 2003, p.6). La parte superior del interceptor debe contar con un dispositivo de cierre automático (válvula tipo flotador) para que inmediatamente el tanque de primeras aguas se encuentre lleno, el resto del efluente pueda ser dirigido a la unidad de filtración.



Figura 5. Tanque de almacenamiento de agua lluvia. *Tomado de:* (Perez Chavero, 2017, p.32)

4.4 Almacenamiento

Corresponde a la estructura destinada para acumular y conservar el agua después de pasar por el proceso de tratamiento, el cual debe cumplir los siguientes requerimientos (CEPIS, 2003, p.7):

- Debe ser impermeable para evitar la pérdida de agua por goteo o transpiración.
- Debe contar con tapa en la parte superior para impedir el ingreso de polvo, insectos y debe ser oscuro para que la luz solar no genere la proliferación de algas.
- Debe disponer de un acceso o tapa lo suficientemente grande para que permita la limpieza del interior del tanque y hacer reparaciones que sean necesarias.

Estos son los componentes básicos que hacen parte de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, en los cuales se observa que no son tecnologías de mucha complejidad y que pueden ser diseñadas y adecuadas en zonas que dispongan del espacio y que cuenten con temporadas de lluvia. Para alcanzar niveles de calidad del agua para que sea apta para consumo humano, es necesario complementar el sistema con procesos de tratamiento que remuevan los contaminantes que esta tenga y que le confiera las propiedades organolépticas deseadas.

5 SISTEMAS CONVENCIONALES DE TRATAMIENTO DE AGUA APLICADOS A SISTEMAS DE AGUA LLUVIA

Los procesos de tratamiento de aguas están compuestos por etapas que conforman el sistema o también llamado tren de tratamiento. A continuación, se identifican las etapas de tratamiento que se implementan en el momento de aprovechar el agua lluvia para usos diferentes al consumo humano. Cada una de las etapas cumple un papel fundamental en la eficiencia del proceso de tratamiento teniendo en cuenta las características fisicoquímicas del afluente a tratar, por lo que el dimensionamiento de las unidades de tratamiento de agua lluvia está directamente relacionado con la zona de interés, los niveles de precipitación promedio, el área disponible para recolección y el número de personas a beneficiarse.

Además de lo anterior, es importante conocer las necesidades a satisfacer, para identificar el sistema de tratamiento que se debe implementar. Si es para usos diferentes al consumo humano tales como riego, aseo de hogar, lavado de ropa, entre otros, basta con implementar procesos físicos de tratamiento, en los cuales se remueven sólidos flotantes y suspendidos en el agua; si el agua lluvia captada es para consumo humano deben aplicarse tratamientos físicos, químicos y biológicos para remover también los microorganismos patógenos del agua, a través de procesos de desinfección.

5.1 Sistemas de filtración

Consiste en el proceso mediante el cual son removidos sólidos suspendidos, coloides, y en ocasiones microorganismos, presentes en el agua, a través del paso de ella por un medio poroso o lecho con material granular (Teixeira & Ghisi, 2019, p.4). Durante el flujo del agua a través del filtro, se van reteniendo los sólidos mayores que el tamaño del poro del lecho. El diseño del filtro tiene en cuenta la longitud de lecho de cada medio filtrante, ya que se debe variar el tamaño de este, cómo se muestra en la *figura 6*, con el fin de que el filtro retenga la mayor cantidad de sólidos que traiga el agua lluvia captada.

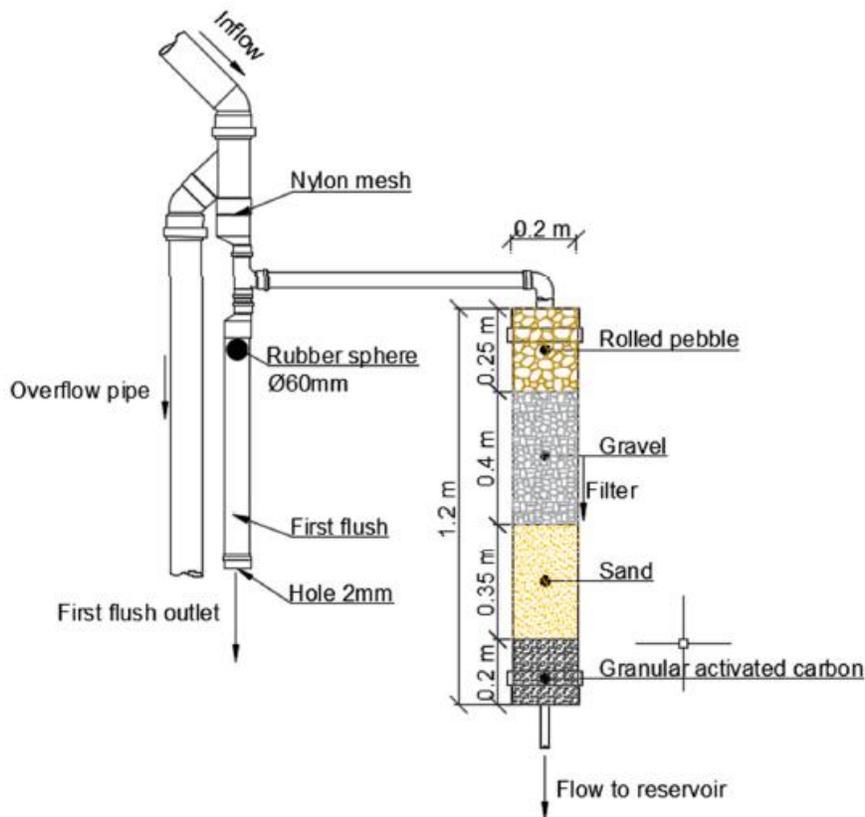


Figura 6. Esquema de un sistema de filtración. Tomado de: (Teixeira & Ghisi, 2019).

En la *figura 6* se observa un sistema de filtración de arena implementado en un sistema de captación de agua lluvia, el cual permite mejorar las características organolépticas del agua. En esta unidad de tratamiento se da la formación de biopelículas o capas biológicas, las cuales se encuentran conformadas por microorganismos, entre ellos algas y bacterias, que son los encargados de degradar la materia orgánica presente en el agua.

Los procesos de filtración también se llevan a cabo a través de membranas, las cuales actúan como barreras selectivas para algunos contaminantes dependiendo de su material y de su porosidad. Hay membranas de gran cantidad de materiales, pueden ser orgánicas elaboradas a partir de polímeros, o pueden ser inorgánicas hechas con metales, cerámica, vidrio, entre otros. Las membranas orgánicas son de buena selectividad y de bajo costo, mientras que las membranas inorgánicas son frágiles y de costo elevado (Eduardo, Mesa, & Luis, 2006).

5.2 Sistemas de desinfección

Permiten el proceso mediante el cual son eliminados los microorganismos, en especial, los agentes patógenos presentes en el agua lluvia captada. Estos microorganismos tienen incidencias en la salud humana, causando enfermedades en el sistema digestivo que pueden ocasionar hasta la muerte. El objeto principal de este proceso es garantizar agua apta para el consumo humano.

5.2.1 Gotas de hipoclorito de sodio

Dentro de sus principales características se tiene la fácil implementación en procesos operativos, su bajo costo y la rápida eliminación de bacterias y organismos patógenos. Para tratamiento de agua lluvia se sugieren concentraciones entre 6 y 10% en volumen. Se recomienda dosificar 1 gota por cada litro de agua.

5.2.2 Pastillas de cloro

Se utilizan en sistemas de pequeña escala durante el proceso de desinfección, ya que ayudan a combatir la contaminación bacteriana y proliferación de algas por su efecto oxidante.

5.2.3 Radiación Ultravioleta

La actividad microbicida en esta modalidad de tratamiento se genera de manera rápida, cuando las bacterias, los virus y los protozoos se exponen a las longitudes de onda germicidas de la luz UV, siendo incapaces de reproducirse e infectar el agua. Durante este proceso no se generan subproductos que sean perjudiciales para la salud.

5.2.4 Desinfección solar

Este proceso se basa en dos componentes de la luz solar: la radiación UV-A con efecto germicida y la radiación infrarroja que provoca una elevación de la temperatura generando un efecto de pasteurización (eliminación de microorganismos patógenos) cuando se alcanzan los 45-50 °C. La combinación de ambos incrementa la eficacia del proceso de desinfección (Canonica, Alder, Marazuela-lamata, & Suter, 2001).

A continuación, se observa en la *figura 7*, el tren de tratamiento para un sistema de aprovechamiento de agua lluvia que tiene como fin el consumo humano, donde se integran el sistema de filtración, en este caso un filtro de arena, y el sistema de desinfección:

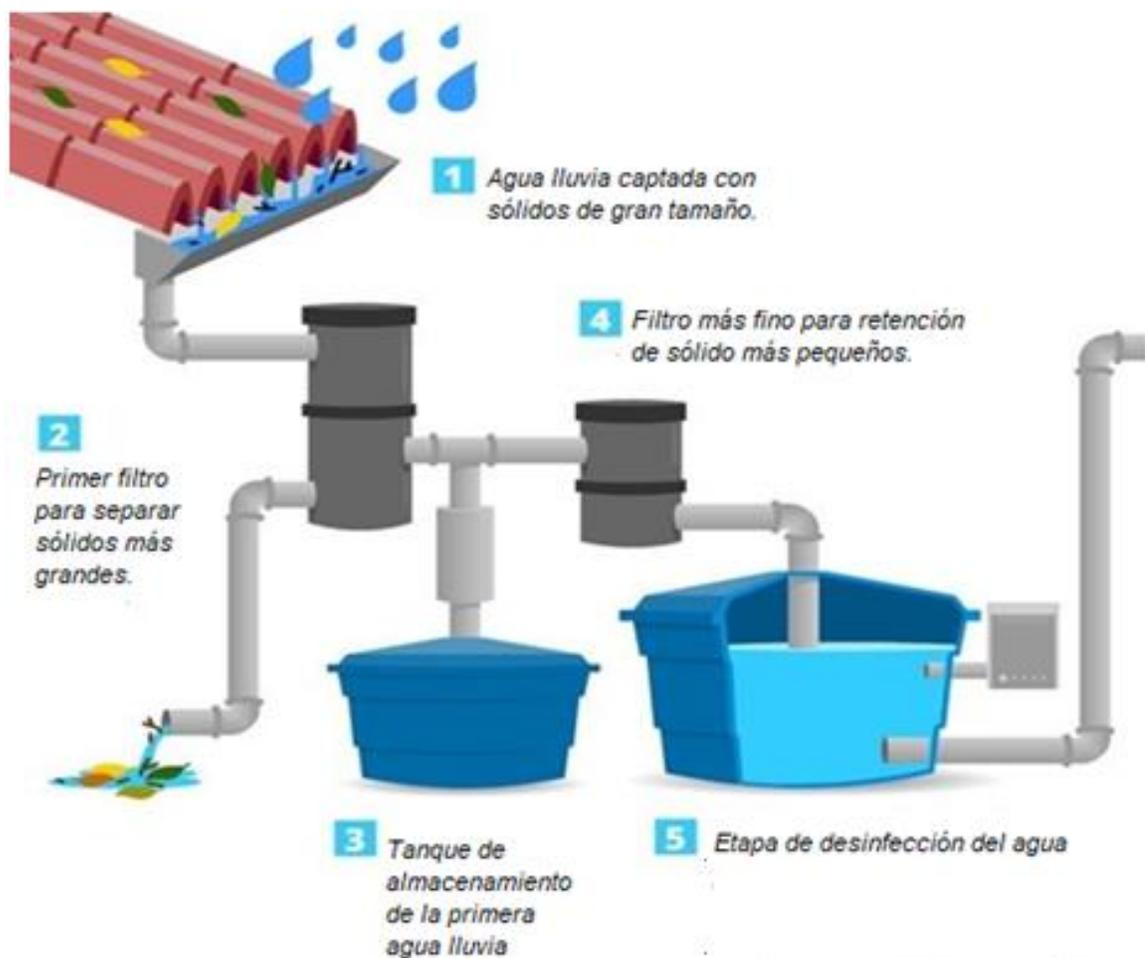


Figura 7. Esquema del tren de tratamiento de agua lluvia con filtración y desinfección. Tomado de: Tecnológicas, I. d. (2019)

6 TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES: PROCESOS AVANZADOS DE OXIDACIÓN

Los procesos avanzados de oxidación -PAO- son procesos complementarios de los tratamiento físicos, químicos y microbiológicos, ya que aumentan la eficiencia por medio de destrucción química de contaminantes presentes en el agua, sin generar nuevos residuos contaminantes como lodos y gases. Estos procesos son fotocatalíticos y degradan compuestos orgánicos presentes en el agua, por medio de la generación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) que son altamente reactivos. Estos procesos son suficientes para la degradación de contaminantes persistentes, los cuales no se degradan con procesos convencionales, y microorganismos patógenos, gracias a su alto potencial de oxidación, carácter bactericida y elevada velocidad de reacción (Miranda García, 2015, p.23). A continuación se describen los PAO clásicos y las nuevas tendencias en investigación para mejorar los procesos de tratamiento (Mazivila, Ricardo, Leitão, & Esteves da Silva, 2019):

6.1 Proceso Fenton

Este proceso consiste en la generación de los radicales $\bullet\text{OH}$ provenientes de la descomposición catalítica de peróxido de hidrogeno (H_2O_2), en presencia de Fe^{2+} en medio ácido. Es el proceso avanzado de oxidación más utilizado por la degradación rápida que lo caracteriza, aunque es limitado porque el rango de pH para su efectividad es de 2,5 a 3,0 (Mazivila et al., 2019, p.3).

6.2 Proceso Foto-Fenton

En este proceso, la reacción del proceso Fenton, entre el hierro y el peróxido de hidrogeno, se acompaña de radiación UV con el fin de aumentar la velocidad de reacción para la generación de hidroxilos. En este proceso el rango de pH del medio también es pequeño, ya que debe estar entre 2,5 y 3,0. Se ha estudiado la posibilidad de realizar el proceso Foto-Fenton con complejos de hierro que permiten la generación de $\bullet\text{OH}$ en medios casi neutros, eliminando la barrera del pH (Mazivila et al., 2019,p.4).

6.3 Ozonización

Este es un método clásico en el que se generan los radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$) a partir de la descomposición del ozono (O_3) en presencia de iones hidroxilo (OH^-) o de otras sustancias como trazas de metales de transición. Con el ozono también se pueden generar los radicales hidroxilos de dos formas: por la reacción de ozono con peróxido de hidrogeno en pH alcalino y por la fotólisis del ozono en medios acuosos (Mazivila et al., 2019,p.5).

En la siguiente figura se observa un comparativo entre los alcances de tratamiento que poseen el tratamiento con luz UV, la oxidación con ozono, que es comúnmente utilizada, y los procesos de oxidación avanzada (AOP por sus siglas en inglés) fenton y foto-fenton. Según la cobertura en tratamiento de contaminantes, los PAO tienen mayor capacidad de eliminación de otros agentes contaminantes en comparación con los otros métodos analizados.

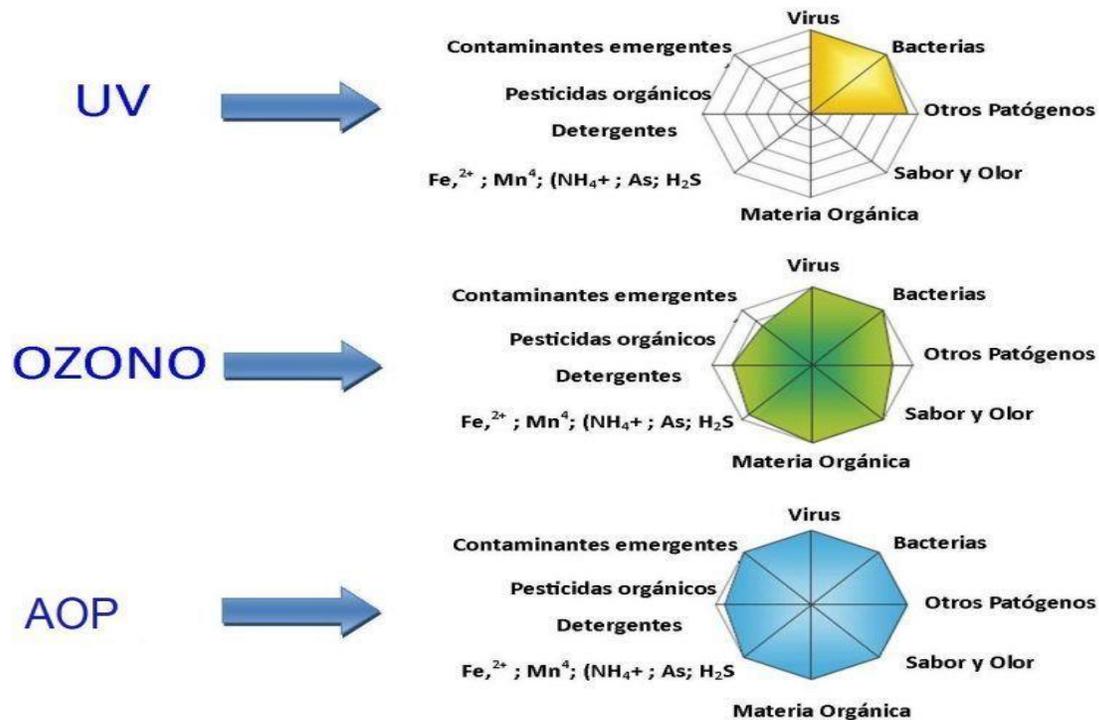


Figura 8. Comparación y alcance los tratamientos con radiación UV, ozono y otros PAO. Tomado de: ASAP, S. T. (2019).

Respecto a este tema se han estudiado nuevas posibilidades de ejecutar los procesos avanzados de oxidación implementando nuevos oxidantes, como los radicales de sulfatos (SO_4^{\bullet}), procesos híbridos con electroquímica y fotocatalisis con semiconductores heterogéneos como el óxido de titanio (TiO_2), procurando mejorar el rendimiento de estos procesos de tratamiento, en especial con elementos recalcitrantes (Mazivila et al., 2019, p.1).

7 SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA LLUVIA IMPLEMENTADOS A NIVEL INTERNACIONAL

7.1 Filtro de membrana de bajo costo creado en África

En el Campus de la universidad de Rhodes, en Sur África, se desarrolló un sistema de filtración para el tratamiento descentralizado del agua lluvia que cae sobre los techos de los edificios del campus, con el fin de potabilizarla para proveer a los estudiantes agua para consumo, en épocas de sequía y escasez (Angala, Tandlich, Ngqwala, & Zuma, 2019).

El filtro llamado Grifaid[®] consta de un sistema de remoción de contaminantes a través de membranas cuya composición no es descrita por propiedad intelectual. El sistema de membranas empleado remueve el 100% de la *E. coli* presente en el agua lluvia y el 100% de la turbiedad medidas en la captación. Además de estos dos parámetros, se evaluaron: pH, el cual no se vio afectado en el tratamiento; y el amoníaco y el aluminio, los cuales no tenían concentración perjudicial para la salud en el agua captada (Angala et al., 2019).

El sistema de filtración cuenta con un sistema de flujo de dos vías que permite el lavado de la membrana continuamente mientras se bombea el agua a tratar. Los contaminantes que son

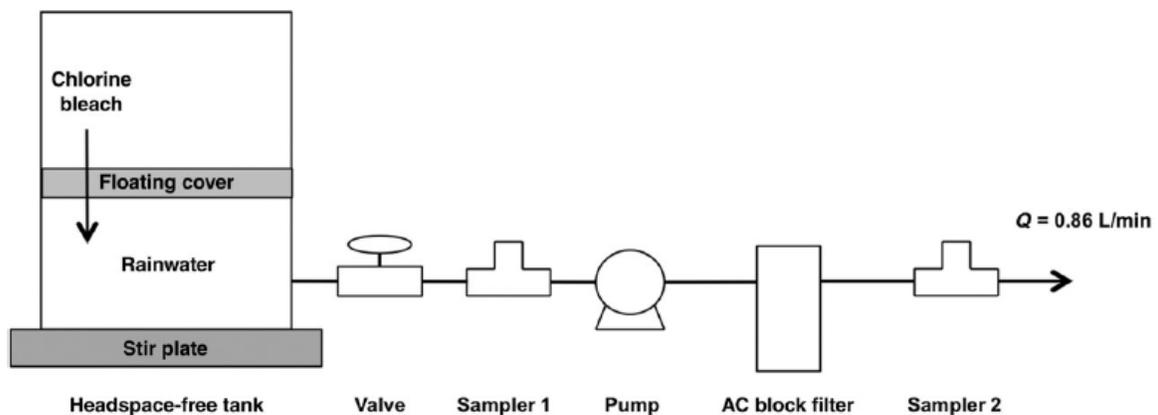
filtrados se remueven de forma segura a través de un tapón de salida habilitado para esto (Grifaid® Organization, 2020). En la *figura 9* se observa en el lado izquierdo el prototipo realizado para el estudio y en el lado derecho, el filtro que es comercializado hoy en día.



Figura 9. Filtro Grifaid: prototipo (lado izquierdo) y versión comercial (Lado derecho). Tomado de: (Angala et al., 2019) y (Grifaid Organization, 2020)

7.2 Filtro de carbón activado y desinfección con cloro utilizado en USA

Identificando el potencial de aprovechamiento de agua lluvia en la zona residencial de Austin, Texas, estudiantes de la universidad de Texas desarrollaron un prototipo de laboratorio para potabilizar el agua lluvia con un tren de tratamiento compuesto por un sistema de desinfección y un sistema de filtración (Keithley, Fakhreddine, Kinney, & Kirisits, 2018). En la *figura 10* se observa el diagrama del proceso implementado durante la investigación.



AC—activated carbon, Q—flow rate

Figura 10. Proceso de tratamiento de agua lluvia a escala de laboratorio. Tomado de: (Keithley et al., 2018)

Para evaluar la viabilidad del sistema de tratamiento implementado, se han medido los parámetros fisicoquímicos del agua lluvia antes del tratamiento y posterior a este. Los parámetros

medidos en el agua fueron: pH, turbiedad, carbono orgánico total, presencia de *E. coli* y coliformes totales, el cloro residual después de la desinfección, y la concentración de trihalometanos (THM), los cuales son subproductos de la desinfección con cloro y son perjudiciales para la salud por su efecto cancerígeno.

El proceso de desinfección propuesto es a través de oxidación con hipoclorito de sodio como primer tratamiento. Un proceso de desinfección más efectivo se logra a valores de pH más bajos, por lo que, si el agua captada tiene un alto valor de pH, se debe garantizar la erradicación de los microorganismos. El riesgo de adquirir cáncer por beber agua clorada es latente si esta no pasa por un proceso de filtración, por lo que posteriormente el agua es bombeada al filtro de carbón activado, en el cual se obtiene un efecto mixto sobre la calidad del agua, ya que disminuye la turbiedad, y elimina los THM presentes después de la desinfección, evitando el riesgo cancerígeno del agua clorada. El filtro de carbón activado debe ser reemplazado regularmente para asegurar la adsorción de los THM.

7.3 Filtro de PVC con lecho de material reciclado en Siria.

En la ciudad de Damasco, Siria, se desarrolló un filtro ecológico donde el material filtrante proviene de residuos de la industria, lo que lo hace un producto que contribuye con el cuidado del medio ambiente desde diferentes puntos de vista, con el fin de alentar a la industria a promover prácticas de reciclaje y reutilización de materiales (Aljerf, 2018) . El filtro consta de un tubo de PVC el cual tiene un lecho de diferentes componentes: vidrio celular, también conocido como vidrio expandido en trozos; vidrio reciclado en trozos; carbón; arena y grava; como se muestra en la *figura 11*:

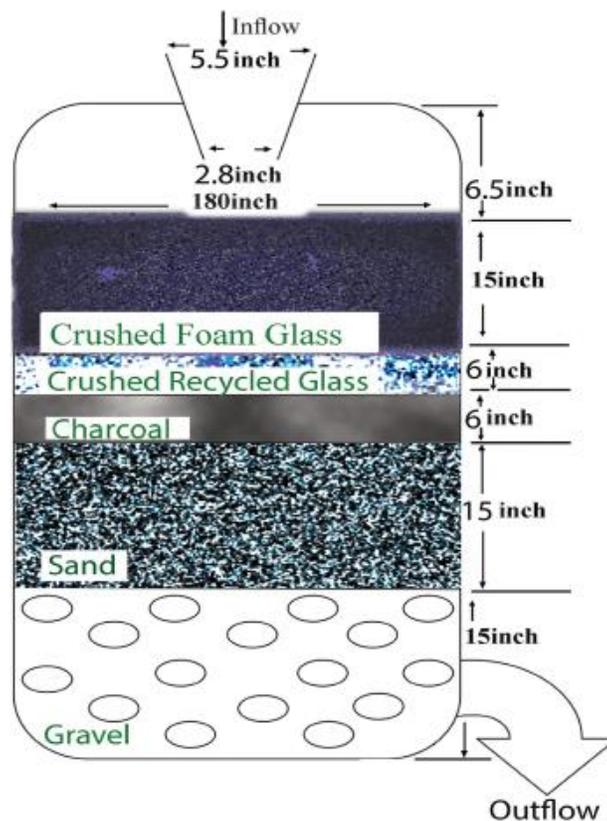


Figura 11. Esquema del sistema de filtración de lecho compuesto. Tomado de: (Aljerf, 2018)

El estudio demostró que el filtro elimina eficazmente la turbiedad del agua, el color, los metales pesados y microorganismos. La remoción de sólidos suspendidos totales tuvo una eficiencia mayor al 79%, removiendo la turbiedad en un 99%, y permitiendo niveles de pH entre 7,3 y 7,8 para el agua lluvia analizada (Aljerf, 2018). Esto permite obtener una nueva fuente de agua apta para consumo humano en Siria, además de contar con un diseño ecológico.

7.4 Comparación entre filtro de arena y filtro de membrana en Brasil

En este estudio se realizó la comparación de dos sistemas de filtración para la potabilización de agua lluvia en la ciudad de Paraná.

Filtro de arena: En primer lugar se analizó el tratamiento a través de un filtro de arena que está compuesto por los siguientes materiales: lecho redondo, grava, arena y carbón activado (Teixeira & Ghisi, 2019), los cuales se muestran en la *figura 12*:



Figura 12. Materiales utilizados en el filtro de arena: a). Lecho redondo, b). Grava, c). Arena y d). Carbón activado. Tomado de: (Teixeira & Ghisi, 2019)

Los materiales antes de ser utilizados en el proceso de filtración pasaron por un tratamiento en el cual la arena, la grava y el lecho redondo se lavaron con agua y se secaron en un horno a 100 °C durante un período de 24 horas. Esto se realizó antes de la construcción del filtro para reducir la turbiedad inicial. En cuanto al carbón activado, se llevó a cabo un proceso de regeneración térmica, donde se activa en un horno a 300 °C durante 24 horas (Teixeira & Ghisi, 2019).

Filtro de membrana: En este estudio, se evaluó la eficiencia de un filtro de membranas de geotextil de poliéster no tejido perforado con aguja, para el tratamiento de agua lluvia. Para la selección de la membrana tuvieron en cuenta propiedades como la permeabilidad, la permitividad y el tamaño de apertura aparente con el fin de evaluar el desempeño hidráulico. En la *figura 13* se observa el diagrama del proceso de filtración de membrana implementado en este estudio.

Comparación: En el estudio descrito se analizó únicamente el proceso de filtración, por lo que se debe considerar el proceso de desinfección necesario para que el agua pueda ser apta para consumo humano.

Con el propósito de analizar la viabilidad de las membranas propuestas como tratamiento de agua lluvia, determinaron los siguientes parámetros: pH, temperatura, turbiedad, alcalinidad, dureza cálcica, y las concentraciones de amoníaco, nitritos, nitratos y fosfatos.

En cuanto a los resultados obtenidos para la turbiedad, ambos filtros lograron su reducción dando cumplimiento a la norma para consumo humano vigente en Brasil. En el caso de la concentración de nitratos no era superior al límite máximo permitido, igual que para los nitritos y el amoníaco.

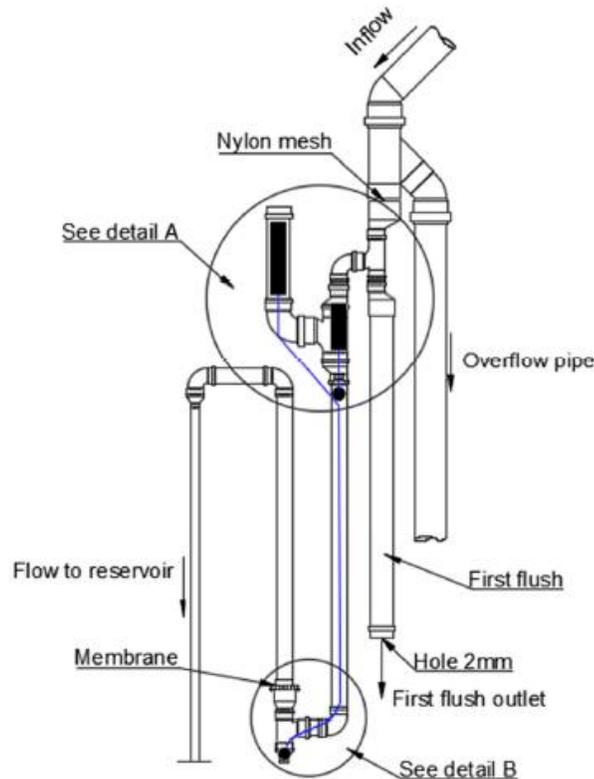


Figura 13. Proceso de filtración de membrana. Tomado de:(Teixeira & Ghisi, 2019)

Con el fin de alcanzar una comparación más amplia, se observaron los porcentajes de remoción para identificar las eficiencias obtenidas con cada método de filtración: el filtro de arena alcanzó eficiencias de: 13,0% para turbiedad, 34,0% para nitrógeno amoniacal y 10,0% para nitratos; en el caso del filtro de membrana, las eficiencias alcanzadas fueron de: 11,0% para turbiedad, 32,1% para nitrógeno amoniacal y 13,6% para nitratos.

Según lo anterior se observan eficiencias similares en ambos métodos, por lo que los investigadores que realizaron el estudio recomiendan el filtro de arena debido a que este filtro no baja su eficiencia con el uso mientras que, en el filtro de membrana, si disminuyó la eficiencia con el uso requiriendo intervenciones de mantenimiento con más frecuencia que para el filtro de arena.

8 SISTEMAS DE POTABILIZACIÓN DE AGUA LLUVIA IMPLEMENTADOS EN COLOMBIA

8.1 Filtros en Arcilla con plata coloidal; Ocaña – Norte de Santander

Este sistema de tratamiento consiste en un mecanismo de filtración y tratamiento de agua de bajo costo, gracias a que las materias primas son de aprovechamiento local, y que está diseñado para su implementación en pequeñas zonas rurales. El medio filtrante es fabricado con materiales comunes, sin tecnologías de alto nivel y dada su estructura permite eliminar la turbiedad, y por el tamaño de los microporos (0,2 a 0,5 micras), evita el paso de bacterias y microorganismo (Br. Soriano Ortiz, 2014). En Colombia La Asociación Ocañera Comercializadora de Productos de Arcilla y Afines (ASOPAFIN) desde el año 2007, es empresa pionera en la implementación y puesta en marcha de estos filtros.

Las especificaciones técnicas son las siguientes: filtro a base de arcilla, aserrín y recubrimiento en plata coloidal. La unidad filtrante (*figura 14*) posee un diámetro de 32 cm, alto 25 cm, capacidad de 10 litros y tasa filtrante de 2 litros por hora generando entre 25 a 30 litros de agua potable por día. La vida útil de la unidad filtrante es de 2 años.

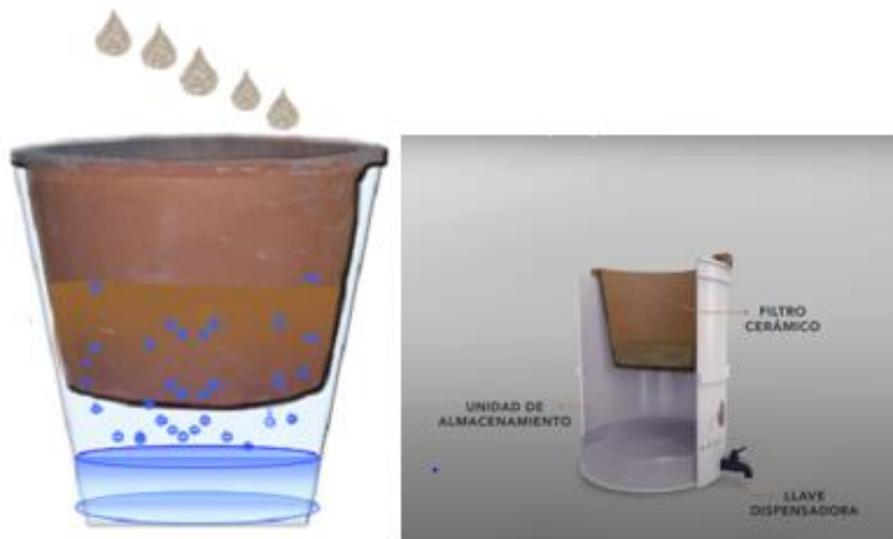


Figura 14. Filtros en arcilla con plata coloidal. Tomado de: (<http://asopafin.com/>, 2019)

8.2 Sistema de captación y filtración de agua lluvia en El Charco – Nariño.

Este sistema de aprovechamiento de agua lluvia consta de una serie de tanques, como se observa en la *figura 15*, que permiten el almacenamiento y tratamiento de gran volumen de agua, por lo cual se requiere disponer de espacio para su instalación. Este modelo es de gran aplicabilidad en zonas altamente lluviosas como la costa pacífica, los cuales en temporadas secas del año puede ser utilizado con agua de fuentes superficiales o complementarse con otro sistema de abastecimiento. El sistema está conformado por una parte de captación y recolección del agua lluvia, a través del techo y los bajantes o canaletas perimetrales; seguidamente está el tanque interceptor de primeras aguas, que arrastran la mayor cantidad de contaminantes; continúa el tanque de recolección del agua con potencial uso y, por último, el tanque de filtrado (Organización Panamericana de la Salud, 2010). Para llevar a cabo la potabilización se recomienda para estos sistemas una dosificación sencilla por medio de gotas de hipoclorito en proporciones de 1 gota por cada litro de agua lluvia filtrada, y para mejorar los resultados en la capacidad de remoción de los filtros, es ideal realizar una limpieza en la superficie de captación antes de iniciar la temporada de lluvias. Una desventaja de esta iniciativa son los costos iniciales relacionados con tubería, accesorios y tanques, además de los mantenimientos preventivos que deben ser periódicos.

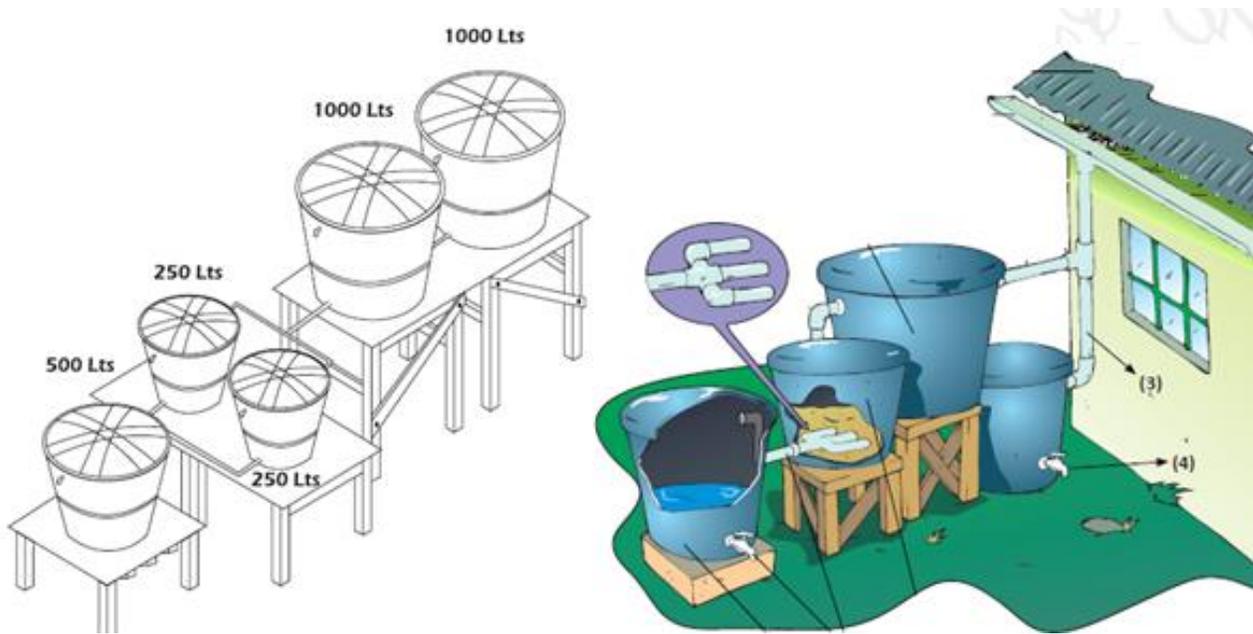


Figura 15. Diseños preparados por el área de Entornos Saludables de OPS/OMS Colombia. Tomado de: (Organización Panamericana de la Salud, 2010)

8.3 Estación potabilizadora de Agua lluvia EPALL en Bajo Berlín – Manizales.

Este innovador sistema de tratamiento fue desarrollado en Manizales y ha recibido diferentes reconocimientos por su potencial aplicación y diseño innovador. Cuenta con un diseño especialmente práctico para uso en zonas rurales. El dispositivo EPALL está conformado por una capa de arena y un filtro en forma de disco, que a su vez está compuesto por arcilla, arena y cascarilla de arroz (Agencia de Noticias Universidad Nacional, 2018). A diferencia de otros filtros, el utilizado en este sistema es una mezcla de los materiales anteriormente mencionados, los cuales al exponerse al fuego acciona un proceso de secado en la arcilla, la cascarilla de arroz se quema y se convierte en carbón activado dentro de la estructura de barro, y la arena hace que el producto sea poroso permitiendo así el flujo del agua. Como etapa final del tratamiento está la desinfección por medio de pastillas de hipoclorito. Este sistema no requiere ningún elemento adicional para la purificación del agua, el elemento más importante es el disco, el cual tiene una duración aproximada de 5 años, siempre y cuando se garantice la ejecución de mantenimiento.



Figura 16. Elaboración de Filtro tipo disco – EPALL. Tomado de: (Agencia de Noticias Universidad Nacional, 2018)

8.4 Flor de la Vida; Medellín – Antioquia

En la ciudad de Medellín se encuentra ubicada la flor de la vida, la cual fue desarrollado por la empresa Gaia Servicios Ambientales y consiste en una estructura captadora de agua lluvia que a su vez la potabiliza y abastece a la población de la comuna 2 de la ciudad (Ruta N Medellín., 2015). En la *figura 17* se observa la flor, la cual cuenta con 4 pétalos en fibra de vidrio con capacidad de almacenamiento de 300 litros en cada uno. Además de esto, su consumo energético es abastecido con energía solar y el agua es tratada por medio de dos filtros en carbón activado, un proceso de ultrafiltración y, por último, luz ultravioleta. Aunque este modelo fue implementado por primera vez en la ciudad de Medellín, se proyecta su implementación alrededor del país, especialmente en zonas de altos índices de lluvia y poco acceso al agua potable.



Figura 17. Flor de la vida en Medellín. Tomado de: (Ruta N Medellín., 2015)

8.5 Alternativas de filtración y desinfección de bajo costo en Santa Marta

En la ciudad de Santa Marta, se realiza un estudio comparativo entre dos métodos de filtración y dos métodos de desinfección del agua, con el fin de identificar alternativas de bajo costo y con resultados eficientes que permitan acondicionar el agua para el consumo humano (Lugo-Arias, Burgos-Vergara, Gould, & Ovallos-Gazabon, 2020).

Se estudian dos biofiltros de arena en los cuales se utiliza arena y grava en diferentes tamaños, y en uno de ellos se incluye una capa de carbón activado para identificar la eficiencia en el tratamiento del agua previo al proceso de desinfección. Los filtros propuestos se muestran la *figura 18*:

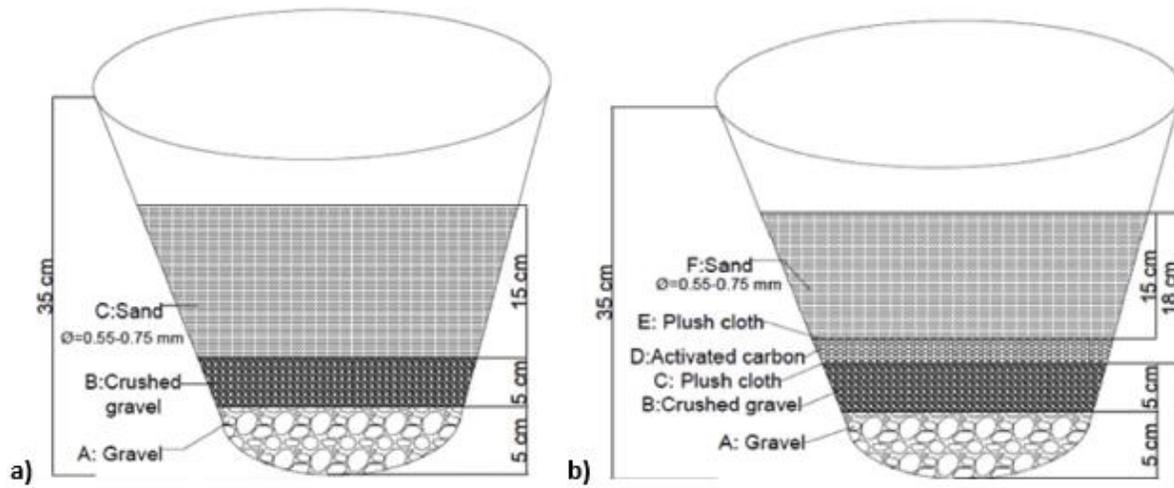


Figura 18. Biofiltros de arena y grava, a) Sin carbón activado y b) Con carbón activado. Tomado de: (Lugo-Arias et al., 2020)

Estudiando la turbiedad, la dureza total y los coliformes totales antes y después de la filtración en ambos diseños, el análisis estadístico indica que ambos filtros tienen una eficiencia del 95% de remoción. Para el proceso de desinfección estudiaron el uso de una lámpara de luz UV-C comercial (*Figura 19*) y el proceso SODIS el cual consiste en exponer el agua en botellas transparentes a la luz solar, en este caso, se hace en botellas de plástico transparente de 2 litros por un tiempo de 8 horas.



Figura 19. Lámpara UV utilizada en experimentación. Tomado de (Lugo-Arias et al., 2020).

La eficiencia en el proceso de desinfección se mide a través del porcentaje de remoción de microorganismos en el agua analizada, donde los resultados indican que ambos métodos tienen una eficiencia del 99% para coliformes totales.

9 ANÁLISIS DE SISTEMAS IMPLEMENTADOS

Alrededor del mundo y en Colombia han sido investigados e implementados diferentes métodos para la captación y el tratamiento de agua lluvia, con el fin de mejorar sus condiciones y adecuarla a la calidad necesaria para el consumo humano. Los sistemas descritos anteriormente muestran la viabilidad del tratamiento del agua lluvia y su potencial uso dentro de las actividades humanas. Así mismo, el gobierno colombiano ha validado su importancia dentro del país, desde la promoción de su uso dentro de los planes de ahorro y uso eficiente del agua, establecido en el decreto 1090 del 2018. Para el caso del suministro de agua propiamente en zonas rurales, se determinan dentro del CONPES 3810 del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2014), los lineamientos y políticas para el servicio de agua potable y saneamiento básico, donde el agua lluvia es una solución alternativa para el suministro de agua en zonas rurales con población dispersa. Con estas potenciales aplicaciones que tiene el agua lluvia, se posibilita el cumplimiento del objetivo de desarrollo sostenible número 6: *Agua limpia y saneamiento básico*, que tiene como meta en Colombia, el acceso al agua para todos, equivalente a un aumento en el suministro de 3 millones de personas para la agenda de 2030.

Para lograr este abastecimiento, el agua lluvia sin duda es una alternativa al alcance de las personas que viven en zonas rurales, aun cuando pertenecen a una población dispersa. Según el desarrollo anterior, se observa que esta alternativa ha sido estudiada alrededor del mundo con el objetivo de tratarla para ser fuente de agua potable. En los sistemas de tratamiento estudiados se alcanzan resultados satisfactorios al implementar un proceso de filtración, con un proceso de desinfección posterior.

En cuanto a procesos de filtración, los sistemas de membranas han sido ampliamente utilizados y sus resultados son positivos, gracias a que realizan el proceso de separación de contaminantes del agua de forma mecánica, a través de la porosidad de dicha membrana, garantizando su retención y mejorando la calidad del agua que ha sido filtrada. Las membranas que se utilizan en los procesos de filtración de agua son de alto costo, y requieren mantenimiento periódico para garantizar su eficiencia, debido a la colmatación de los poros por los contaminantes retenidos, los cuales deben ser limpiados para continuar su uso.

Los lechos de material granular son implementados con frecuencia en diferentes sistemas de tratamiento de agua, con el fin de retener los contaminantes en el lecho, gracias a la porosidad de los materiales implementados. En este caso de filtración, hay gran variedad de materiales para la generación del lecho, entre los cuales, uno de los más utilizados es el carbón activado, el cual gracias a su poder adsorbente garantiza las características organolépticas como olor y sabor que son necesarias para el agua apta para el consumo humano. Los demás materiales que componen los filtros granulares son arena, grava, y se ha validado hasta el funcionamiento de material reciclado (Aljerf, 2018), como vidrio y vidrio expandido. Estos materiales remueven los contaminantes a través de la limitación del paso de estos gracias a la porosidad que tienen, aunque el vidrio expandido no es un material ampliamente utilizado en Colombia. Por otro lado, la arcilla, que si es ampliamente utilizada en el país y de bajo costo, puede adaptarse a estos diseños con una estructura porosa.

En cuanto a los sistemas de desinfección, el hipoclorito de sodio fue ampliamente utilizado en los estudios mencionados, con resultados viables para su implementación en este tipo de

sistemas. Es un desinfectante que se puede utilizar en forma líquida o en forma de pastillas, pero el uso de estas últimas no es muy recomendable ya que contienen ácido tricloroisocianúrico, el cual es nocivo para la salud por el contenido de cianuro. Por otro lado, La luz ultravioleta como proceso de desinfección mostró resultados de efectividad, aunque requiere de un consumo eléctrico que no está disponible en todas las zonas rurales del país.

De acuerdo con el análisis anterior, se resumen las siguientes alternativas para analizar su implementación en zonas rurales de Colombia:

A: Filtración y desinfección con membranas.

B: Filtración con arena, grava y carbón activado. Desinfección con gotas de hipoclorito de sodio.

C: Filtración y desinfección a base de arcilla, aserrín y recubrimiento en plata coloidal.

D: Filtración con disco de arcilla, arena y cascarilla de arroz. Desinfección con hipoclorito de sodio en pastillas.

Para la selección de la alternativa que mejor se ajuste a las condiciones de las poblaciones rurales del país, se emplea el método de promedio ponderado de las alternativas, donde se destacan los siguientes criterios de evaluación, con base en las investigaciones planteadas anteriormente y en la concepción técnica sobre el tema: Calidad del agua, costos asociados, mantenimiento, diseño ergonómico y manufactura.

A cada criterio se le asignó un peso relativo asociado al alcance de cada alternativa para satisfacer la necesidad del tratamiento de agua lluvia para su satisfactoria implementación en zonas rurales de Colombia. La asignación de cada peso relativo se describe a continuación:

- **Calidad del agua:** Este es objetivo principal al implementar un sistema de tratamiento de agua, por lo que se asigna el mayor puntaje con un 40% de peso. La calidad alcanzada del agua es un parámetro del que depende la salud y bienestar de las personas que la consumen, por lo que se debe garantizar el cumplimiento de las características físicas, químicas y microbiológicas, establecidas en la resolución 2115 de 2007, relacionada con el agua apta para consumo humano.
- **Costos asociados:** La implementación de la alternativa depende de los costos asociados, tanto en materiales y manufactura, como en mantenimiento. Es por esta razón que se busca que sea un sistema de tratamiento al alcance de las personas de zonas rurales o que sea viable para los apoyos que ofrece el gobierno desde proyectos de la dirección nacional de planeación y el ordenamiento territorial. Por esta razón es el segundo criterio con más peso, con un valor asignado del 25%.
- **Mantenimiento:** Este es uno de los motivos por los que la vida útil de muchos sistemas y plantas de tratamiento de aguas reducen su vida útil significativamente, porque no se hace un adecuado mantenimiento que permita su correcto funcionamiento. El sistema será utilizado por personas que no cuentan con conocimientos específicos para realizar mantenimientos técnicos al sistema, por eso se valora con un 20% de peso este criterio, resaltando la importancia de su practicidad, es decir, que sea un mantenimiento fácil de hacer y que no sea muy recurrente.
- **Diseño ergonómico:** El diseño del sistema debe tener en cuenta que está orientado para poblaciones rurales, que en muchas ocasiones se encuentran dispersas montaña adentro, por lo cual se considera importante su fácil manipulación, donde se consideran características como peso, volumen, número de piezas y posibilidad de preensamble. Este criterio tiene un peso del 10%.

- **Manufactura:** En este criterio se resalta la importancia de la facilidad en el desarrollo e implementación del sistema en el lugar final de uso, donde se desea que llevar a cabo estas actividades no requiere de conocimientos técnicos o especializados, para disminuir barreras para su uso en poblaciones rurales del país. Este criterio tiene un peso del 5%.

Cada una de las alternativas descritas anteriormente se evaluó con un puntaje de 0 a 10 según la satisfacción de los criterios, donde 0 es que no satisface lo deseado y 10 significa que lo satisface completamente. El desarrollo del promedio ponderado para cada alternativa se presenta a continuación (*Tabla 1*):

Tabla 1. Método de promedio ponderado para análisis de alternativas, Elaboración propia.

Criterios de selección	Peso relativo	Alternativas			
		A	B	C	D
Calidad del agua	40%	10	10	10	10
Precio	25%	2	8	10	10
Mantenimiento	20%	2	5	8	7
Manufactura	10%	3	8	9	5
Diseño ergonómico	5%	5	8	8	8
	Ponderado	5,5	8,2	9,4	8,8

Los puntajes asignados en cada uno de los criterios parten del uso adecuado de cada uno de los sistemas propuestos, teniendo en cuenta la adición de los desinfectantes y la ejecución del mantenimiento en los tiempos establecidos según las investigaciones.

De acuerdo con el resultado del análisis ponderado, la alternativa con más viabilidad para ser usada en zonas rurales del país es la alternativa C, donde se realiza un proceso de filtración y desinfección a base de arena y arcilla que pasa por un proceso de horneado a una temperatura de 920°C y una quema con duración de 16 horas para la formación de carbón activado, además del uso de la unidad de desinfección por medio del recubrimiento con plata coloidal.

10 APLICACIÓN DE SISTEMA SELECCIONADO EN UNA COMUNIDAD DE TURBO-ANTIOQUIA

10.1 Problemática en la zona

Turbo es un distrito de Colombia localizado en la subregión de Urabá en el departamento de Antioquia, que cuenta con un terminal marítimo, por el cual se exportan importantes cantidades de banano y plátano (economía principal de la región), dulces, calzado y cerámicas a base de arcilla, siendo este último un gran atractivo por ser una roca sedimentaria constituida por diferentes agregados minerales e impurezas que le brindan una variedad de colores y propiedades. Este municipio, a pesar de limitar con la subcuenca del Río Turbo (Norte), el Golfo de Urabá (Occidente), y la cuenca del Río Guadualito (Sur) (UT POMCA Río Turbo, 2018), presenta anualmente desabastecimiento de agua potable durante el segundo bimestre (Marzo – Abril).

Actualmente el sistema de Acueducto del Municipio es operado y administrado por la empresa Aguas Regionales EPM, donde la principal fuente de abastecimiento está constituida por el río Turbo y en casos de emergencia y contingencia por 4 fuentes subterráneas. Durante la mayoría del año el río abastece con facilidad los 155 l/s que consume la población, sin embargo, en épocas de verano intenso el río tiene caudales mínimos inferiores a este valor, donde los reportes en las estaciones de aforo han logrado detectar caudales hasta de 60 l/s, los cuales no deberían

presentarse en una cuenca que tiene 150 km². Como resultado de lo anterior, la oferta hídrica se ve afectada por la mala utilización desde el punto de vista de calidad y cantidad, debido a la contaminación por medio de la utilización de pesticidas, residuos de abonos químicos y en gran medida por la deforestación (UT POMCA Río Turbo, 2018).

Históricamente, se han presentado eventos de sequía en el municipio de Turbo con diferentes grados en la severidad de la disminución de lluvias, representando un importante riesgo en la disponibilidad de agua sobre grandes porciones del territorio. La sequía de 2020 (marzo y abril) ha sido la más importante desde comienzo de siglo, presentando disminución de caudal tratado alrededor del 70%, lo cual se puede evidenciar en el registro histórico de la tabla 2, donde se observa cómo año tras año, los impactos ocasionados por el cambio climático son más severos y obligan a mirar hacia otros horizontes con el fin de buscar una medida que ayude a disminuir esa ausencia de agua potable durante ese par de meses.

Tabla 2. Fuente de información – Aguas Regionales EPM. Elaboración propia.

PRODUCCIÓN ACUEDUCTO EN m ³ - TURBO												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2011	367.919	379.612	378.303	338.093	338.093	367.858	357.305	357.305	346.425	420.939	417.015	338.223
2012	340.201	402.860	343.056	368.966	369.598	336.999	358.877	317.961	350.898	410.826	453.736	456.446
2013	454.422	377.116	377.260	374.536	382.156	373.045	381.190	351.190	373.759	345.053	410.021	405.878
2014	444.861	249.936	268.191	250.166	392.381	398.616	341.080	358.302	346.640	344.184	379.959	345.603
2015	327.576	175.416	126.461	257.603	257.507	368.382	344.619	333.409	376.136	364.252	321.462	365.141
2016	372.817	245.560	199.119	258.732	313.461	309.153	363.785	391.080	369.792	367.328	370.558	385.311
2017	386.400	292.863	335.976	357.622	348.037	295.832	363.731	397.493	338.281	369.259	368.860	442.222
2018	433.430	385.951	315.803	360.224	379.142	373.913	372.868	387.263	379.892	380.784	372.535	400.352
2019	406.338	223.855	190.307	310.664	357.851	339.705	386.543	345.796	359.065	354.376	371.245	325.600
2020	385.304	314.997	194.514	203.195								

Al analizar el comportamiento del caudal disponible para abastecer el casco urbano, mostrado en la *figura 20*, se observa que el promedio de los últimos 10 años presenta reducciones significativas de caudal desde el mes de febrero alcanzando niveles mínimos en los meses de marzo y abril. Cabe mencionar que esos caudales presentados en los meses de mayores impactos están apoyados por las fuentes de agua subterránea que administra el operador del sistema que, a pesar de su disponibilidad para suplir el déficit, las horas permitidas de operación están limitadas por la autoridad ambiental a 16 horas al día.



Figura 20. Caudal promedio tratado 2011-2020. Fuente propia

Como se mencionó anteriormente, la sequía es un tema de gran importancia para la zona, lo cual no refleja un panorama positivo a través de los estudios que se realizan, y tal es el ejemplo de los resultados publicados por el estudio nacional del agua 2018 (ENA), donde Turbo se ubican en zona con presencia de sequía extrema, lo que se puede validar con los datos relacionados a los años 2016, 2019 y 2020 de la *tabla 2*.

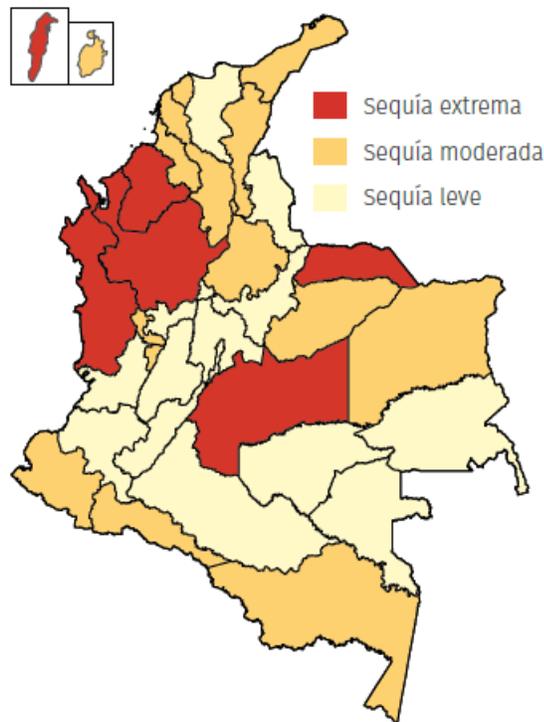


Figura 21. Zonas de afectación – Temporada seca

Por otro lado, de los 11 municipios que conforman el Urabá antioqueño, Turbo se ubica en la posición 6 (Tabla 3) con mayores precipitaciones presentadas anualmente, que corresponden a alrededor del 8% del total de la zona del Urabá (Gobernación de Antioquia, 2016), donde tal potencial hídrico es fortalecido durante los meses de octubre y noviembre.

Tabla 3. Precipitación promedio anual, por subregiones y municipios. Fuente Anuario estadístico de Antioquia 2016.

Código región	Código zona	Subregiones y municipios	Zonas de Antioquia	Corp. autónoma regional	Subregión según división de la corporación autónoma regional	Área municipio (km ²)	Ppam promedio (mm/año)	Ppam % (mm/año)
SR09	Z23	Apartadó	Urabá Centro	Corpourabá	Centro	534	2.600	8%
SR09	Z24	Arboletes	Urabá Norte		Caribe	753	1.600	5%
SR09	Z23	Carepa	Urabá Centro		Centro	387	3.200	9%
SR09	Z23	Chigorodó				720	3.800	11%
SR09	Z25	Murindó	Atrato Medio		Atrato	1.264	5.400	16%
SR09	Z23	Mutató	Urabá Centro		Nutibara	1.196	4.300	13%
SR09	Z24	Necoclí	Urabá Norte		Caribe	1.253	2.000	6%
SR09	Z24	San Juan de Urabá				252	1.800	5%
SR09	Z24	San Pedro de Urabá				602	1.600	5%
SR09	Z23	Turbo	Urabá Centro		Centro	2.953	2.700	8%
SR09	Z25	Vigía del Fuerte	Atrato Medio		Atrato	1.659	5.100	15%
SR09	SR09	Urabá				11.573	34.100	100%

De acuerdo con este análisis de afectación, la implementación de una estrategia para el tratamiento de agua lluvia, se ha enfocado en 3 temas de gran importancia para el municipio, como lo son la exportación de cerámica a base de arcilla, los impactos de la sequía y las precipitaciones anuales. Por esta razón, es conveniente que los distintos organismos focalicen sus esfuerzos hacia estos temas y se comience a buscar una estrategia que garantice que la comunidad pueda contar con agua potable todo el año.,

10.2 Viabilidad de implementación

Desde el 2007 se han desarrollado en Colombia distintos sistemas donde la materia prima es la arcilla, los cuales funcionan como una unidad casera de tratamiento y almacenamiento. En estos sistemas, se han evidenciado remociones hasta del 99% en parásitos, bacterias y sólidos suspendidos, cuyo valor agregado es la manera sencilla de contar con un filtro de carbón activado a partir del uso de aserrín o cáscaras de arroz, mejorando las características organolépticas del agua.

De acuerdo con el análisis presentado en este trabajo, se pretende resaltar el hecho de que una alternativa de tratamiento de agua lluvia puede impactar de forma positiva a un municipio que

anualmente es golpeado por el fenómeno climático de la sequía. Tal alternativa, incluiría el paso adicional de agregar cáscara de arroz o aserrín a la preparación de la arcilla, la cual es una actividad económica que se desarrolla ampliamente en el municipio (*figura 22*).



Figura 22. Arcilla: actividad económica de Turbo Antioquia. Tomado de: Captura propia.

Si a cada una de estas personas, cuya economía principal se basa en la fabricación de elementos a base de arcilla, se le realiza un trabajo de asesoría – capacitación, en donde se le indiquen las ventajas de adicionar aserrín a su mezcla principal, se asegura que puedan contar con un sistema que les garantizará agua potable. Al tener estos sistemas compactos se debe garantizar una fuente de agua a tratar y ahí es donde se aprovecha un tema cultural de la población general del municipio, puesto que, desde sus antepasados, están enseñados a que cada hogar debe contar con grandes almacenamientos subterráneos para lograr almacenar la cantidad de agua necesaria para abastecerse en los tiempos de sequía extrema anuales. Considerando esto, el sistema de filtración propuesto es una alternativa viable para implementar en la zona.

Básicamente, el molde de arcilla tras ser fabricado debe colocarse sobre un recipiente en donde servirá como almacenamiento. Dimensionar este recipiente debe tener en cuenta la cantidad de agua que se demandará para consumo humano, teniendo presente además la tasa de filtración que oscilará entre 2 a 2,5 litros/segundo.

Dentro de la etapa final de desinfección se recomienda realizar un estudio de costo beneficio entre los químicos plata coloidal e hipoclorito de sodio, ya que el primero oscila en el mercado nacional con valores entre 30.000 y 40.000 pesos colombianos en recipientes de 500 ml, mientras que el hipoclorito de sodio puede conseguirse a 55.000 pesos colombianos en recipientes de 22 litros. En los procesos de tratamiento convencionales es muy utilizado el hipoclorito de sodio tanto líquido como gaseoso por su poder desinfectante, bajo costo, fácil transporte y su poder remanente que proporciona mayor durabilidad en la desinfección. A parte de los análisis de costo es necesario estudiar más sobre los impactos negativos que pueden presentarse al utilizar plata coloidal, ya que estudios recientes han demostrado que las nanopartículas de plata se disuelven bajo las mismas condiciones ácidas del estómago, produciendo iones de plata potencialmente peligrosos para la salud, provocando la condición anormal de salud llamada argiria, que hace que la piel se torne gris-azulosa.

En caso de realizar la etapa de desinfección con hipoclorito se recomienda desinfectar teniendo en cuenta la siguiente dosificación: 1 gota del químico por cada litro de agua filtrado.

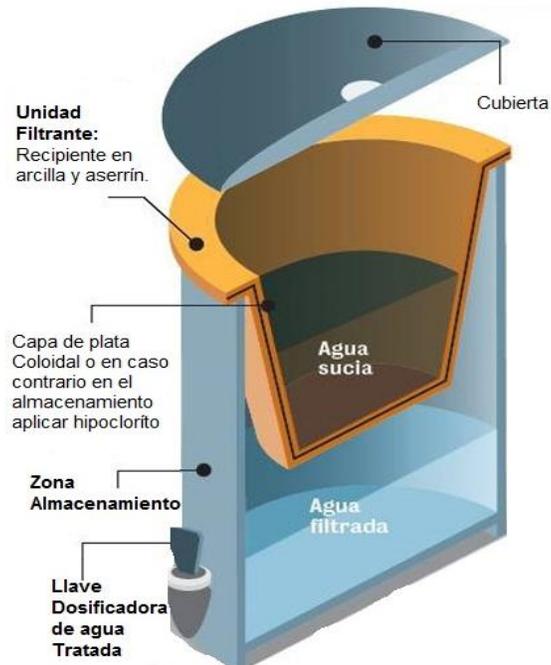


Figura 23. Esquema de tratamiento agua lluvia. Tomado de: (<https://www.ecofiltro.com/>, 2019)

10.3 Recomendaciones de uso del sistema de captación de agua lluvia

- Realizar la captación del agua lluvia a través de la superficie de los techos de la forma más limpia posible, por lo tanto, se recomienda antes de iniciar las temporadas de lluvia, realizar la limpieza retirando sólidos grandes como hojas y retirando el polvo si es posible. De esta forma se logran mejores resultados y el agua se ajusta con más facilidad a la normatividad. En el anexo A se observa las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del agua lluvia captada luego de hacer la limpieza del techo de captación, mientras que en el anexo B se observan los resultados para un agua lluvia captada en el mismo techo, pero sin hacer limpieza. Los resultados difieren, indicando que la limpieza del área de captación ayuda a obtener un agua de mejor calidad.
- La ubicación de las canoas o rejillas perimetrales de captación debe garantizar una inclinación para el correcto flujo del agua, por lo que se debe tener una pendiente entre 2% y 4% para garantizar el flujo de agua y a su vez evitar velocidades del agua superiores a 1.00 m/s.
- Para determinar el volumen de almacenamiento de agua lluvia se deben tener presentes los coeficientes de escorrentía asociados a cada uno de los tipos de materiales a utilizar en los techos.
- Se recomienda realizar la instalación de rejillas en las canaletas para la separación de sólidos grandes que sean arrastrados por el agua. Además de esto se considera importante contar con un separador de las primeras aguas, para evitar el paso de sólidos grandes al sistema de filtración y para reducir la carga contaminante del agua que pasará por el proceso de potabilización. El tanque de primeras aguas se debe calcular a razón de un litro de agua por cada metro cuadrado de superficie de captación.
- Además de hacer uso de fuentes alternativas de agua, se recomienda hacer un uso eficiente de este recurso, teniendo en cuenta que la disponibilidad de agua para todos depende de su correcta gestión. Reutilizar el agua del lavado a máquina, cerrar la llave mientras se usa el

jabón y reducir los consumos innecesarios, son un aporte significativo al cuidado del agua y a la solución de las problemáticas enunciadas.

11 CONCLUSIONES

Algunas de las zonas con desabastecimiento de agua potable en Colombia, cuentan con temporadas de lluvia que permitirían acceder a este recurso para mejorar sus condiciones de salud y vida. Con la implementación de esta alternativa es posible hacer una mejor gestión del agua, desde una fuente renovable que tiene alto potencial de uso, y es de libre acceso.

El tratamiento de agua lluvia con fines de potabilización es un tema ampliamente investigado y puesto en práctica a nivel nacional e internacional. Los resultados arrojados por los estudios analizados muestran la viabilidad del agua lluvia como solución para las zonas donde hay desabastecimiento del recurso.

En el análisis técnico de las alternativas estudiadas, se consideraron como criterios importantes de selección la calidad del agua obtenida, el precio, el mantenimiento, la manufactura y el diseño ergonómico, teniendo en cuenta que es para uso de personas sin conocimientos técnicos y para llevar a zonas retiradas y en algunos casos de difícil acceso. Según dicho análisis, la alternativa de mayor viabilidad es el filtro de arcilla recubierto con plata coloidal, ya que cumple en mayor proporción con los criterios propuestos.

El correcto manejo del agua y su buena gestión se puede promover desde las actividades que abarcan el día a día de todas las personas. El uso del agua lluvia es sin duda una forma práctica de hacerlo, ya que permite dar un uso a estas aguas antes de ser vertidas. Además de lo anterior, se resalta su potencial uso para consumo humano, con lo que se obtienen impactos sociales y económicos positivos.

12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aljerf, L. (2018). ADVANCED HIGHLY POLLUTED RAINWATER TREATMENT. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 12, 50–58. <https://doi.org/10.4090/juee.2018.v12n1.050058>
- Angala, H. A., Tandlich, R., Ngqwala, N., & Zuma, B. (2019). Efficiency of a Decentralised System in the Treatment of Rainwater in South Africa. 137–138. https://doi.org/10.24193/awc2019_01
- Banco Mundial. (2014). Hacia la paz sostenible, la erradicación de la pobreza y la prosperidad compartida.
- Br. Soriano Ortiz, F. H. (2014). Eficiencia del filtro de arcilla en la purificación del agua para consumo humano en Cajamarca. Universidad Privada Del Norte, 1–134.
- Canonica, S., Alder, A. C., Marazuela-lamata, M. D., & Suter, M. J. (2001). Does sunlight change the material and content of polyethylene terephthalate (PET) bottles? (May 2014). <https://doi.org/10.2166/aqua.2001.0012>
- CEPIS. (2003). Especificaciones Técnicas Captación de Agua de Lluvia Para Consumo Humano.
- DNP. (2014). Política para el suministro de agua potable y saneamiento básico en la zona rural. 1–46. Retrieved from <http://www.minvivienda.gov.co/conpesagua/3810 - 2014.pdf>
- Eduardo, M., Mesa, G. P., & Luis, J. (2006). Procesos de membranas para el tratamiento de agua residual industrial con altas cargas del colorante amarillo ácido 23. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, unknown(38), 53–63.
- Gobierno de Colombia. (2017). Plan director de agua y sanemiento básico. 1–108.
- Grifaid Organization. (2020). Grifaid Filter data sheet and instructions.
- Keithley, S., Fakhreddine, S., Kinney, K., & Kirisits, M. (2018). Effect of Treatment on the Quality of Harvested Rainwater for Residential Systems. *Journal AWWA*.
- Lugo-Arias, J., Burgos-Vergara, J., Lugo-Arias, E., Gould, A., & Ovallos-Gazabon, D. (2020). Evaluation of low-cost alternatives for water purification in the stilt house villages of Santa Marta's Ciénaga Grande. *Heliyon*, 6(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e03062>
- Mazivila, S. J., Ricardo, I. A., Leitão, J. M. M., & Esteves da Silva, J. C. G. (2019). A review on advanced oxidation processes: From classical to new perspectives coupled to two- and multi-way calibration strategies to monitor degradation of contaminants in environmental samples. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 24, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00072>
- Ministerio de la protección social. (2007). Resolución 2115/2007. *Gaceta Oficial*, 23. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Ministerio de mambiente y desarrollo sostenible de Colombia. (2018). Estudio Nacional del Agua 2018. Retrieved from http://www.andi.com.co/Uploads/ENA_2018-comprimido.pdf
- Miranda García, N. (2015). DEGRADACIÓN DE CONTAMINANTES EMERGENTES

MEDIANTE TiO₂ INMOVILIZADO E IRRADIACIÓN SOLAR.

- Novak, C. A., DeBusk, K. M., & Van Giesen, E. (2014). Designing Rainwater Harvesting Systems : Integrating Rainwater Into Building Systems. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsebk&AN=712372&lang=es&site=eds-live>
- Perez Chavero, J. de J. (2017). SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA PLUVIAL EN LOS MÓDULOS DE MOVILIDAD 1 , ESTIMANDO EMISIONES DE CO₂.
- Sutorius, M., & Rodríguez, S. (2015). La fundamentalidad del derecho al agua en Colombia. *Revista Derecho Del Estado*, (35), 243–265. <https://doi.org/10.18601/01229893.n35.09>
- Teixeira, C. A., & Ghisi, E. (2019). Comparative analysis of granular and membrane filters for rainwater treatment. *Water (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11051004>

ANEXO A: Caracterización de agua lluvia con lavado previo de zona de captación.

El siguiente es el análisis realizado a una muestra de agua lluvia tomada en Caucaasia – Antioquia, donde se observa su condición inicial para pasar al sistema de tratamiento que permite su filtración y desinfección para cumplir con los valores de referencia establecidos en la resolución 2115 de 2007.



ACREDITADO
ONAC
ORGANISMO NACIONAL DE
ACREDITACIÓN DE COLOMBIA

ISO/IEC 17025: 2005
1B-LAB-004



AGUASCOL
LABORATORIO DE ENSAYO - ANÁLISIS DE AGUAS

PROCESO DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO					
INFORME DE RESULTADOS					
Versión: 08		Código: F-MA-02		Fecha: 2016-10-20	
No. De Informe:		ILAA-2019-251			
Fecha (aaaa-mm-dd):		Caucaasia, 2019-11-26			
DATOS GENERALES DEL CLIENTE					
Entidad	AGUASCOL S.A. E.S.P.	NIT (ó cc)	830505339-0		
Dirección	CRA 42 B # 63C-51, Medellín	Teléfono	2350713		
Contacto	William Gómez	Proyecto	Análisis de agua		
RECEPCIÓN DE LA MUESTRA					
Fecha y hora de recepción (aaaa-mm-dd / hh:mm)		2019-11-12 10:03			
Observaciones		Muestra y parámetro de campo tomada por el cliente interno. El análisis de las muestras se ejecutaron tal y como fueron recibidas. N.A: No aplica; N.E: No especificado; N.D: No disponible			
Subcontratación		N.A			
INFORMACIÓN DEL PROCESO DE MUESTREO					
Código de laboratorio	Punto de muestreo	Fecha y hora (aaaa-mm-dd / hh:mm)	Tipo	Parámetros de campo	Observaciones
LAA1201	Caucaasia, El Centro, carrera 4 # 20-35.	2019-11-12 09:45	Puntual	pH: 7,4 Unid de pH Temperatura: 25,4 °C	Agua de lluvia
Ubicación: Municipio de Caucaasia.					
Responsable: Alberio Coronado.					
RESULTADOS DE ENSAYO					
Parámetro (Unidades)	*Valor de Referencia	Código de Muestra			
		LAA1201			
Turbiedad (NTU)	≤2,0	1,98			
Color aparente (UPC)	≤15,0	1,2			
Alcalinidad total (mg/L CaCO3)	<200,0	<20			
Dureza total (mg/L CaCO3)	≤300,0	14,4			
Hierro total (mg/L Fe)	≤0,3	0,06			
Coliformes totales (UFC/100ml)	0	>80			
E. coli (UFC/100ml)	0	41			

* El valor de Referencia es tomado de la Resolución 2115 de 2007.

ANEXO B: Caracterización agua lluvia un mes luego del lavado

El siguiente es el análisis realizado a la segunda muestra de agua lluvia tomada en el mismo lugar, pasado un mes de pasada la limpieza de la superficie de captación. Se observa que las condiciones fisicoquímicas del agua cambian de forma significativa.



PROCESO DE MUESTREO Y ANALISIS DE LABORATORIO					
INFORME DE RESULTADOS			Fecha: 2016-10-20		
Versión: 08		Codigo: F-MA-02			
No. De Informe:		LAA-2019-276			
Ciudad, Fecha (aaaa-mm-dd):		Caucasia, 2019-12-19			
DATOS GENERALES DEL CLIENTE					
Entidad	William Gómez Ortega	NIT (6 cc)	1088488366		
Dirección	Cra 4 N° 20-35 B/ El Centro	Teléfono	301-294-1595		
Contacto	William Gómez Ortega	Proyecto	Sistema de tratamiento de aguas lluvias.		
RECEPCIÓN DE LA MUESTRA					
Fecha y hora de recepción (aaaa-mm-dd / hh:mm)		2019-12-08 09:15			
Observaciones		Muestra y parámetros de campo tomadas por el cliente interno. El análisis de la muestra se ejecutó tal y como fue recibida. N.A: No aplica; N.E: No especificado; N.D: No disponible			
Subcontratación		N.A			
INFORMACIÓN DEL PROCESO DE MUESTREO					
Código de laboratorio	Punto de muestreo	Fecha y hora (aaaa-mm-dd / hh:mm)	Tipo	Parámetros de campo	Observaciones
LAA1325	Caucasia. El centro Cra. 4 N° 20-35.	2019-12-08 08:55	Puntual	pH: 7.66 Unid de pH Temperatura: 24,4 °C	Agua de lluvia
Ubicación: Municipio de Caucasia.					
Responsable: Nicolás Casarubia.					
RESULTADOS DE ENSAYO					
Parámetro (Unidades)	Código de Muestra				
	LAA1325				
Turbiedad (NTU)	8,29				
Color aparente (UPC)	4,2				
Alcalinidad total (mg/L CaCO3)	14,1				
Dureza total (mg/L CaCO3)	15,0				
Hierro total (mg/L Fe)	<0,10				
Coliformes totales (UFC/100ml)	>80				
E. coli (UFC/100ml)	>80				