



*Optimización del diseño de filtros lentos de arena para potabilización de agua subterránea destinada a consumo humano*

*Optimization of the design of slow sand filters for the purification of groundwater intended for human consumption*

*Otimização do projeto de filtros lentos de areia para purificação de águas subterrâneas destinadas ao consumo humano*

José Gerardo León-Chimbolema <sup>I</sup>  
[gerardo.leon@epoch.edu.ec](mailto:gerardo.leon@epoch.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-9202-8542>

**Correspondencia:** [gerardo.leon@epoch.edu.ec](mailto:gerardo.leon@epoch.edu.ec)

Ciencias Técnicas y aplicadas

Artículo de Investigación

\* **Recibido:** 29 de abril de 2025 \* **Aceptado:** 23 de mayo de 2025 \* **Publicado:** 30 de junio de 2025

I. Doctor en Química, Máster en Protección Ambiental, Docente investigador, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador.

## Resumen

El acceso a agua potable segura constituye una prioridad en las comunidades rurales, especialmente en aquellas donde las fuentes subterráneas presentan contaminación microbiológica. En este contexto, los filtros lentos de arena representan una alternativa práctica y de bajo costo para potabilizar el agua.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar los resultados experimentales obtenidos durante la fase práctica desarrollada en el recinto San José, cantón Naranjito, donde se evalúa la eficiencia de filtros lentos de arena para la remoción de coliformes totales y *E. coli*. Se emplea un enfoque experimental de tipo aplicado, utilizando prototipos a escala piloto en condiciones reales de laboratorio y de campo. Se analizan tres configuraciones de filtros: arena tradicional, arena fina y filtro mixto (arena-zeolita). Las técnicas utilizadas comprenden análisis microbiológicos (recuento en agar m-Endo) y físico-químicos.

Los resultados muestran que el filtro mixto, operado a  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ , logra remociones de coliformes totales cercanas al 100%, cumpliendo con la Norma INEN 1108. No obstante, velocidades de filtración más altas reducen la eficiencia a valores entre el 80% y el 88%. Se observa que la granulometría del medio filtrante y la velocidad de operación son determinantes para la eficacia del sistema. En conclusión, este estudio evidencia que la implementación práctica de filtros mixtos en el recinto San José es una solución efectiva y sostenible para mejorar la calidad microbiológica del agua subterránea.

**Palabras clave:** Filtros; agua potable; coliformes; granulometría; velocidad de filtración.

## Abstract

Access to safe drinking water is a priority in rural communities, especially those where groundwater sources are microbiologically contaminated. In this context, slow sand filters represent a practical and low-cost alternative for water purification.

This work presents the experimental results obtained during the practical phase developed at the San José campus, Naranjito canton, where the efficiency of slow sand filters for the removal of total coliforms and *E. coli* was evaluated. An applied experimental approach is used, using pilot-scale prototypes under real-world laboratory and field conditions. Three filter configurations are analyzed: traditional sand, fine sand, and a mixed filter (sand-zeolite). The techniques used include

microbiological (m-Endo agar count) and physical-chemical analyses. The results show that the mixed filter, operated at  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ , achieves total coliform removal rates close to 100%, complying with INEN Standard 1108. However, higher filtration rates reduce efficiency to values between 80% and 88%. It is observed that the particle size of the filter medium and the operating speed are decisive factors for the system's effectiveness. In conclusion, this study demonstrates that the practical implementation of mixed filters at the San José site is an effective and sustainable solution for improving the microbiological quality of groundwater.

**Keywords:** Filters; drinking water; coliforms; particle size; filtration rate.

## Resumo

Access to safe drinking water is a priority in rural communities, especially those where groundwater sources are microbiologically contaminated. In this context, slow sand filters represent a practical and low-cost alternative for water purification.

This work presents the experimental results obtained during the practical phase developed at the San José campus, Naranjito canton, where the efficiency of slow sand filters for the removal of total coliforms and *E. coli* was evaluated. An applied experimental approach is used, using pilot-scale prototypes under real-world laboratory and field conditions. Three filter configurations are analyzed: traditional sand, fine sand, and a mixed filter (sand-zeolite). The techniques used include microbiological (m-Endo agar count) and physical-chemical analyses. The results show that the mixed filter, operated at  $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ , achieves total coliform removal rates close to 100%, complying with INEN Standard 1108. However, higher filtration rates reduce efficiency to values between 80% and 88%. It is observed that the particle size of the filter medium and the operating speed are decisive factors for the system's effectiveness. In conclusion, this study demonstrates that the practical implementation of mixed filters at the San José site is an effective and sustainable solution for improving the microbiological quality of groundwater.

**Keywords:** Filters; drinking water; coliforms; particle size; filtration rate.

## Introducción

El acceso a agua potable segura es un derecho humano fundamental y un requisito indispensable para la salud y el bienestar de las poblaciones (Organización Mundial de la Salud, 2018). Sin embargo, en zonas rurales como el recinto San José, cantón Naranjito, provincia del Guayas

(Ecuador), el suministro de agua subterránea se ve amenazado por contaminantes físicos, químicos y microbiológicos, especialmente la presencia de coliformes totales (Gallegos Maridueña, 2023). Esta problemática se agrava debido a la actividad agrícola intensiva, el uso excesivo de agroquímicos y la falta de infraestructura de potabilización adecuada (Gallegos Maridueña, 2023). Los filtros lentos de arena (SSF, por sus siglas en inglés) se han utilizado históricamente como una tecnología de bajo costo, eficaz y sostenible para mejorar la calidad microbiológica del agua destinada a consumo humano (Huisman & Wood, 1974; Loganathan et al., 2015). Este método de tratamiento se basa en procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren principalmente en la capa superior del lecho filtrante, conocida como *schmutzdecke*, que actúa como una biopelícula natural para la remoción de bacterias y otros patógenos (Muhammed et al., 1996; Mwabi et al., 2013).

Estudios recientes destacan la importancia de optimizar parámetros de diseño como la granulometría de la arena, la velocidad de filtración y la altura del lecho filtrante para incrementar la eficiencia de remoción de microorganismos (Jain et al., 2020; Loganathan et al., 2015). Por ejemplo, se ha demostrado que velocidades de filtración bajas ( $0.1\text{--}0.2\text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ) y arenas con diámetros efectivos ( $d_{10}$ ) entre 0.15 y 0.35 mm, con un coeficiente de uniformidad menor a 3, favorecen la formación de la *schmutzdecke* y mejoran la remoción microbiológica (Muhammed et al., 1996; Loganathan et al., 2015). Además, ajustes en el diseño hidráulico y la profundidad del lecho pueden contribuir a una mayor retención de sólidos y a una reducción de coliformes totales, cumpliendo con estándares internacionales como la Norma INEN 1108 (Gallegos Maridueña, 2023).

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo optimizar el diseño de filtros lentos de arena para potabilizar agua subterránea destinada a consumo humano en zonas rurales, considerando como caso de estudio el recinto San José. Se busca integrar los aprendizajes obtenidos en la tesis de Gallegos Maridueña (2023) y las mejores prácticas internacionales identificadas en la literatura reciente (Mwabi et al., 2013; Jain et al., 2020; Loganathan et al., 2015), con el fin de proponer criterios de diseño y operación más eficientes y sostenibles para este tipo de tecnologías.

A fin de comprender de manera integral el funcionamiento y las ventajas de los filtros lentos de arena para la potabilización del agua subterránea, es necesario presentar el sustento teórico que respalda su diseño, operación y eficiencia microbiológica. Para ello, se expone a continuación el

desarrollo conceptual y técnico que fundamenta esta tecnología, considerando tanto la literatura científica como las experiencias de campo relevantes para la optimización del sistema:

*Contaminación microbiológica del agua subterránea y sus riesgos para la salud humana*

El agua subterránea es una de las principales fuentes de abastecimiento para el consumo humano en zonas rurales y semiurbanas debido a su disponibilidad relativa y a su protección natural frente a la contaminación superficial. No obstante, diversos estudios han evidenciado que, en muchas regiones agrícolas e industriales, el agua subterránea presenta contaminación microbiológica significativa, particularmente por coliformes totales y *Escherichia coli* (*E. coli*), bacterias que son indicadores de contaminación fecal y representan un riesgo elevado para la salud pública (Guanilo et al., 2021; Gallegos Maridueña, 2023).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2018) define al agua potable como aquella que no contiene microorganismos patógenos en concentraciones que representen un peligro para la salud, especificando que la presencia de coliformes totales y *E. coli* debe ser nula en 100 mL de muestra. En Ecuador, la Norma INEN 1108 establece estos mismos criterios, considerando como indispensable la ausencia de estos microorganismos para calificar el agua como apta para el consumo humano (Gallegos Maridueña, 2023). Sin embargo, la realidad en comunidades rurales como el recinto San José, en el cantón Naranjito, refleja concentraciones de coliformes totales que superan con creces estos límites: hasta 195 UFC/100 mL, lo que evidencia un problema sanitario grave (Gallegos Maridueña, 2023).

Las principales causas de la contaminación microbiológica en aguas subterráneas incluyen las malas prácticas agrícolas (uso excesivo de fertilizantes y pesticidas), las descargas de aguas residuales no tratadas y las fugas en sistemas de saneamiento (Caraballo y Xavier, 2017; Cerón et al., 2021). Adicionalmente, la permeabilidad del terreno, la presencia de fisuras geológicas y las lluvias intensas pueden facilitar la infiltración de contaminantes hacia los acuíferos (Ruiz y González, 2019).

La exposición prolongada al consumo de agua contaminada con coliformes y otros microorganismos patógenos puede ocasionar enfermedades diarreicas agudas, infecciones gastrointestinales y otras afecciones como dermatitis, otitis y conjuntivitis (Mwabi et al., 2013). Según la OMS (2018), cada año aproximadamente 1,8 millones de personas mueren a causa de enfermedades relacionadas con el consumo de agua contaminada, lo que resalta la magnitud del problema.

En este contexto, es crucial implementar tecnologías de tratamiento que garanticen la eliminación de microorganismos y cumplan con las normas de potabilidad establecidas (OMS, 2018; INEN 1108). Los filtros lentos de arena se presentan como una alternativa eficaz y sostenible para remover coliformes totales y otros microorganismos en el tratamiento de agua subterránea, especialmente en comunidades rurales con recursos limitados (Huisman & Wood, 1974; Loganathan et al., 2015).

### **Principios y mecanismos de remoción en los filtros lentos de arena**

Los filtros lentos de arena (SSF, por sus siglas en inglés) constituyen una tecnología ampliamente utilizada para la potabilización de agua, especialmente en zonas rurales y periurbanas debido a su bajo costo, simplicidad operativa y eficacia en la remoción de contaminantes microbiológicos (Huisman & Wood, 1974; Loganathan et al., 2015). Su funcionamiento se basa en una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en el lecho filtrante y, especialmente, en la capa superior conocida como *schmutzdecke*, la cual desempeña un papel esencial en la eficiencia del proceso (Muhammed et al., 1996).

#### **Procesos físicos**

El principal mecanismo físico en los filtros lentos de arena es la filtración mecánica, que retiene partículas en suspensión mediante tamizado entre los poros del medio filtrante (Huisman & Wood, 1974). Este proceso se ve influido directamente por la granulometría de la arena (diámetro efectivo y coeficiente de uniformidad), que define el tamaño de los poros y su capacidad para atrapar partículas sólidas y microorganismos de mayor tamaño (Jain et al., 2020). Además, la sedimentación juega un papel complementario, ya que las partículas más densas se depositan en las capas superiores del filtro.

#### **Procesos químicos**

Dentro del lecho filtrante, ocurren procesos de adsorción química y reacciones redox que contribuyen a la retención de contaminantes disueltos y microorganismos (Loganathan et al., 2015). Las superficies de los granos de arena pueden adsorber compuestos orgánicos y metales pesados, aunque en el contexto de potabilización rural, la remoción de microorganismos patógenos mediante adsorción es menos significativa en comparación con el efecto de la biopelícula (Muhammed et al., 1996). Asimismo, la presencia de oxígeno disuelto favorece la formación de óxidos que pueden inmovilizar algunos compuestos químicos.

### ***Procesos biológicos***

La schmutzdecke, o biopelícula superficial, es uno de los elementos clave para la eficiencia de los filtros lentos de arena. Se trata de una capa de microorganismos (bacterias, protozoos, algas y hongos) que se desarrolla en la interfaz agua-arena y actúa como un sistema biológico natural de depuración (Huisman & Wood, 1974; Mwabi et al., 2013). Esta capa es responsable de la degradación de materia orgánica y de la eliminación microbiológica mediante predación, competencia y adsorción biológica (Loganathan et al., 2015). Estudios recientes han destacado que la presencia de especies bacterianas en la schmutzdecke mejora la remoción de *E. coli* y coliformes totales, aumentando así la seguridad sanitaria del agua (Guanilo et al., 2021).

La formación de la schmutzdecke requiere un período de maduración que puede variar de varios días a semanas, dependiendo de las condiciones de operación (velocidad de filtración, calidad del agua cruda y temperatura ambiental). Durante este tiempo, la eficiencia microbiológica aumenta progresivamente (Mwabi et al., 2013).

### ***Interacción de procesos***

Los procesos físicos, químicos y biológicos interactúan de manera sinérgica para lograr la remoción de microorganismos y partículas. Por ejemplo, la retención física de partículas por tamizado facilita la posterior descomposición de materia orgánica por la schmutzdecke (Huisman & Wood, 1974). Además, la adsorción en las superficies minerales y la acción de depredación microbiana contribuyen a una remoción efectiva de patógenos, lo que permite cumplir con normativas de calidad como la INEN 1108 (Gallegos Maridueña, 2023).

En resumen, los filtros lentos de arena representan una tecnología integral que combina procesos de filtración mecánica, adsorción química y biodegradación, permitiendo una remoción eficiente de contaminantes y microorganismos presentes en el agua subterránea (Huisman & Wood, 1974; Loganathan et al., 2015).

### ***Parámetros de diseño y operación de filtros lentos de arena***

El diseño y la operación de filtros lentos de arena son aspectos determinantes para garantizar su eficiencia en la remoción de contaminantes y, en particular, de microorganismos patógenos presentes en el agua subterránea. Un diseño adecuado, acompañado de una operación controlada, permite optimizar la formación de la schmutzdecke y la interacción de procesos físicos, químicos y biológicos que contribuyen a la potabilización del recurso hídrico (Huisman & Wood, 1974; Loganathan et al., 2015).

### ***Granulometría del medio filtrante***

La granulometría de la arena es uno de los parámetros más relevantes en el diseño de filtros lentos de arena. Se define principalmente a través del diámetro efectivo ( $d_{10}$ ) y el coeficiente de uniformidad (Cu). Según Jain et al. (2020), un diámetro efectivo de 0,15 a 0,35 mm y un Cu menor a 3 aseguran un balance adecuado entre la velocidad de filtración y la retención de partículas y microorganismos. Arenas más finas pueden aumentar la eficiencia de remoción, pero reducen la velocidad de filtración y favorecen la colmatación; mientras que arenas más gruesas permiten mayores caudales, pero disminuyen la capacidad de remoción microbiológica (Gallegos Maridueña, 2023).

### ***Velocidad de filtración***

La velocidad de filtración es otro parámetro crítico para la eficacia del filtro. Valores recomendados oscilan entre 0,1 y 0,4  $m^3/m^2/h$ , dependiendo de la calidad del agua bruta y de las características del medio filtrante (Muhammed et al., 1996). Velocidades más bajas favorecen el desarrollo de la schmutzdecke y mejoran la eficiencia de remoción de microorganismos como E. coli y coliformes totales (Mwabi et al., 2013). Por el contrario, velocidades elevadas pueden provocar un arrastre prematuro de partículas y un rendimiento microbiológico reducido.

### ***Altura del lecho filtrante***

La altura del lecho filtrante (arena) tiene una influencia directa en el tiempo de retención y en la capacidad de remoción de sólidos y microorganismos. Se recomienda una altura mínima de 0,7 m, que se complementa con capas inferiores de grava y gravilla que actúan como soporte hidráulico y evitan la migración de arena fina (Huisman & Wood, 1974). Gallegos Maridueña (2023) destaca que alturas adecuadas permiten una maduración eficiente de la schmutzdecke y favorecen la remoción microbiológica cumpliendo con los estándares de la Norma INEN 1108.

### ***Diseño hidráulico***

El diseño hidráulico incluye aspectos como la distribución del flujo, la uniformidad de la carga hidráulica y el sistema de drenaje. Un flujo ascendente o descendente bien distribuido previene la formación de canales preferenciales que reducen la eficiencia de remoción (Loganathan et al., 2015). Además, es necesario prever una altura de seguridad para evitar desbordamientos y garantizar una operación continua y estable (Gallegos Maridueña, 2023).

### ***Relación entre parámetros de diseño y operación***

El correcto dimensionamiento de la granulometría, la velocidad de filtración y la altura del lecho filtrante permite optimizar la formación de la schmutzdecke y potenciar los procesos de filtración, adsorción y biodegradación (Mwabi et al., 2013). Esto contribuye a la remoción efectiva de microorganismos patógenos y al cumplimiento de las normas de potabilidad (INEN 1108 y OMS, 2018).

En síntesis, el diseño y la operación de los filtros lentos de arena requieren un equilibrio entre eficiencia microbiológica y factibilidad operativa, considerando las características específicas del agua subterránea y las necesidades de la comunidad de estudio (Gallegos Maridueña, 2023).

### ***Experiencias internacionales y estudios de caso sobre filtros lentos de arena***

El uso de filtros lentos de arena (SSF) ha sido documentado a nivel mundial como una solución eficaz y sostenible para la potabilización de agua, especialmente en comunidades rurales y periurbanas con recursos limitados (Huisman & Wood, 1974; Mwabi et al., 2013). La flexibilidad de diseño, la facilidad de operación y el bajo costo de mantenimiento convierten a los filtros lentos de arena en una alternativa viable para mejorar la calidad microbiológica del agua subterránea.

### ***Aplicaciones comunitarias y rurales***

En África y Asia, diversas experiencias han demostrado la eficacia de los SSF para tratar agua subterránea contaminada microbiológicamente, alcanzando eficiencias de remoción de coliformes totales superiores al 95% en condiciones controladas (Mwabi et al., 2013). Por ejemplo, estudios realizados en Sudáfrica evidenciaron que los filtros lentos de arena domésticos redujeron significativamente las concentraciones de *E. coli* y coliformes totales, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos por la OMS (Mwabi et al., 2013). De manera similar, en India, Jain et al. (2020) reportaron que la correcta selección granulométrica y la operación a velocidades de filtración bajas (0,1 a 0,2 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h) permitieron alcanzar eficiencias de remoción de hasta el 99% de coliformes totales.

### ***Optimización de filtros y ajustes operativos***

Estudios recientes han explorado ajustes en los parámetros de diseño para maximizar la eficiencia de los SSF. Muhammed et al. (1996) investigaron la reducción de la profundidad del lecho filtrante y su impacto en la remoción de turbidez y patógenos, demostrando que profundidades mínimas de 0,7 m combinadas con una granulometría adecuada y un coeficiente de uniformidad menor a 3 son suficientes para garantizar la eficiencia microbiológica. Loganathan et al. (2015) destacaron la

importancia de mantener velocidades de filtración bajas para favorecer el desarrollo de la schmutzdecke y mejorar la calidad del agua tratada.

### **Innovaciones en el diseño y en los materiales filtrantes**

Si bien la arena es el medio filtrante tradicionalmente utilizado, algunas investigaciones han evaluado la incorporación de materiales alternativos como la zeolita, la antracita o mezclas de arena y zeolita para mejorar la retención de contaminantes (Gallegos Maridueña, 2023; Loganathan et al., 2015). En Ecuador, Gallegos Maridueña (2023) comparó un filtro lento de arena tradicional con un filtro mixto de arena y zeolita, evidenciando que el filtro mixto logró una remoción del 100% de coliformes totales, cumpliendo con la Norma INEN 1108. Esto resalta la potencialidad de incorporar mejoras locales adaptadas a las características específicas del agua subterránea y a las necesidades comunitarias.

### ***Factibilidad económica y social***

La implementación de filtros lentos de arena en comunidades rurales ha demostrado ser socialmente aceptable y económicamente viable debido a su bajo costo de construcción, facilidad de operación y mantenimiento mínimo (Huisman & Wood, 1974; Mwabi et al., 2013). Además, su adaptabilidad a diferentes escalas (doméstico o comunitario) y la posibilidad de utilizar materiales locales facilitan su implementación en zonas de difícil acceso. No obstante, el éxito de estos sistemas requiere un acompañamiento técnico para el diseño adecuado y un programa de capacitación comunitaria para su operación y mantenimiento (Loganathan et al., 2015).

En resumen, las experiencias internacionales y estudios de caso confirman que los filtros lentos de arena representan una opción efectiva y sostenible para la potabilización de agua subterránea en comunidades rurales, especialmente cuando se optimizan sus parámetros de diseño y se adapta la tecnología a las condiciones locales (Gallegos Maridueña, 2023; Mwabi et al., 2013).

### **Materiales y métodos**

El presente estudio corresponde a una investigación de tipo aplicada, con un enfoque experimental y cuantitativo, orientada a optimizar el diseño de filtros lentos de arena para la potabilización de agua subterránea destinada a consumo humano en el recinto San José, cantón Naranjito. Se trabajó con un diseño experimental que permitió evaluar el comportamiento de diferentes configuraciones de filtros en condiciones de laboratorio y campo.

La muestra del estudio consistió en agua subterránea proveniente de un pozo de uso comunitario del recinto San José. Se tomaron muestras representativas de agua cruda de acuerdo con protocolos estandarizados de muestreo y se realizaron análisis físico-químicos y microbiológicos para determinar los niveles iniciales de coliformes totales y *E. coli*, así como parámetros como turbidez, pH y sólidos disueltos.

Como técnicas e instrumentos de análisis, se empleó el método de cultivo en agar m-Endo para la determinación de coliformes totales y *E. coli*, conforme a los lineamientos de la Norma INEN 1108 y la metodología recomendada por la APHA (2017). Para el análisis físico-químico, se utilizaron turbidímetro, medidor de pH y conductímetro, garantizando la confiabilidad y precisión de las mediciones.

Para la fase experimental, se construyeron prototipos de filtros lentos de arena a escala piloto. Se diseñaron y evaluaron tres configuraciones: filtro de arena tradicional, filtro de arena fina y filtro mixto (arena-zeolita). Cada filtro fue construido con un lecho filtrante de 0,70 m de altura y una capa de grava de soporte de 0,30 m, siguiendo recomendaciones técnicas de Huisman y Wood (1974) y las adaptaciones de Gallegos Maridueña (2023). Se probaron velocidades de filtración de 0,1, 0,2 y 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h para evaluar su influencia en la eficiencia microbiológica de los filtros.

El proceso experimental consistió en operar los filtros de manera continua durante un período de cuatro semanas para permitir la formación y maduración de la schmutzdecke, registrando semanalmente los datos de remoción de coliformes y turbidez. Los resultados fueron analizados utilizando estadística descriptiva (media y desviación estándar) y análisis de varianza (ANOVA) para identificar diferencias significativas entre las configuraciones y velocidades de filtración, con un nivel de significancia del 5% ( $p < 0,05$ ). De esta manera, se estableció un proceso sistemático y riguroso para evaluar la eficacia de los filtros lentos de arena en condiciones reales del recinto San José.

## Resultados

Los resultados obtenidos durante la fase experimental permitieron analizar de manera detallada el comportamiento de los filtros lentos de arena en la remoción de coliformes totales y *E. coli* en el agua subterránea del recinto San José. Según los análisis microbiológicos iniciales, el agua cruda presentó una concentración promedio de 195 UFC/100 mL de coliformes totales, evidenciando así la necesidad urgente de implementar tecnologías de potabilización que garanticen la seguridad

sanitaria del recurso hídrico y cumplan con los estándares establecidos por la Norma INEN 1108 (Gallegos Maridueña, 2023). Este resultado es consistente con estudios previos que reportan altos niveles de contaminación microbiológica en fuentes subterráneas de zonas rurales, atribuibles a malas prácticas agrícolas, deficiencias en el saneamiento y la infiltración de aguas residuales (Mwabi et al., 2013; Loganathan et al., 2015).

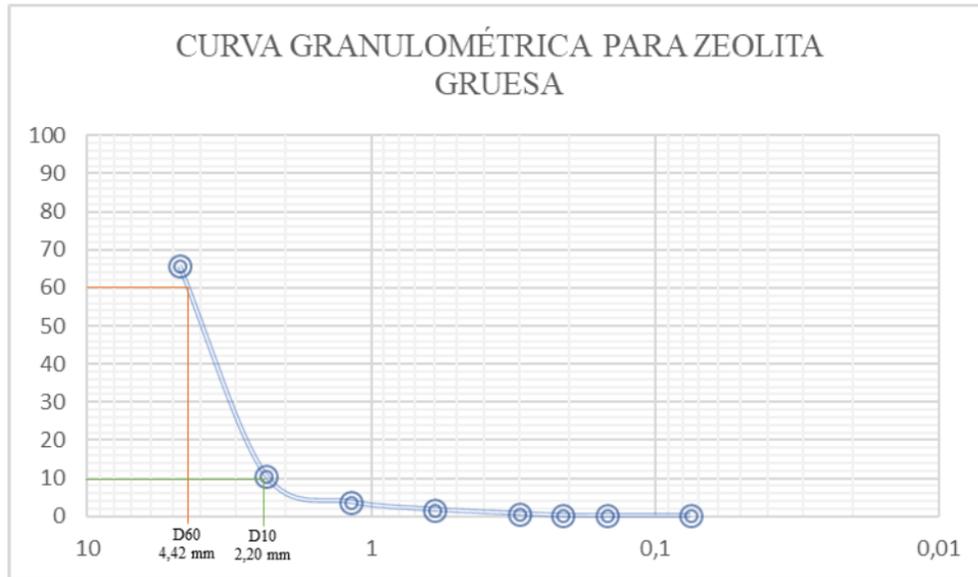
En relación con la eficiencia de remoción de coliformes totales, se observó que la configuración del filtro mixto de arena y zeolita operado a una velocidad de filtración de  $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$  alcanzó valores cercanos al 100% de remoción en todos los muestreos realizados. Este resultado evidencia la robustez de este sistema y su capacidad para cumplir con los estándares de la Norma INEN 1108, demostrando su viabilidad técnica como solución de potabilización en comunidades rurales (Gallegos Maridueña, 2023). En comparación, el filtro de arena fina alcanzó una eficiencia promedio del 97% y el filtro de arena tradicional del 95% bajo las mismas condiciones, lo que confirma la ventaja de utilizar medios filtrantes mixtos que favorecen la formación de la *schmutzdecke* y mejoran la retención microbiológica, tal como señalan Loganathan et al. (2015).

No obstante, al incrementar la velocidad de filtración a  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ , la eficiencia de remoción disminuyó de forma significativa en todas las configuraciones de filtro evaluadas, alcanzando valores entre el 80% y el 88%. Este hallazgo concuerda con lo reportado por Jain et al. (2020), quienes explican que velocidades de filtración más elevadas reducen el tiempo de contacto entre el agua y la *schmutzdecke*, limitando los procesos biológicos y físicos que contribuyen a la eliminación de microorganismos patógenos. Por ello, se reafirma que, para garantizar un rendimiento óptimo y sostenible, es indispensable operar los filtros lentos de arena a velocidades bajas, priorizando la calidad microbiológica del agua por encima del caudal de tratamiento.

Por otro lado, la caracterización granulométrica de los medios filtrantes, que se presentan en las figuras 1 y 2, se demuestra que la arena fina empleada en el filtro mixto posee un tamaño efectivo ( $d_{10}$ ) de 0,15 mm y un coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) de 2,0, lo que facilitó la formación de la *schmutzdecke* y favoreció la remoción microbiológica. La inclusión de zeolita como medio complementario aportó propiedades adicionales de adsorción y mejoró la estructura porosa, contribuyendo al aumento de la eficiencia del sistema (Gallegos Maridueña, 2023). Asimismo, se registró una reducción promedio de turbidez cercana al 70% en todas las configuraciones de filtro, lo que indica una adecuada retención de sólidos suspendidos y mejora sensorial del agua, aunque este parámetro no presentó diferencias significativas entre las configuraciones evaluadas. Este

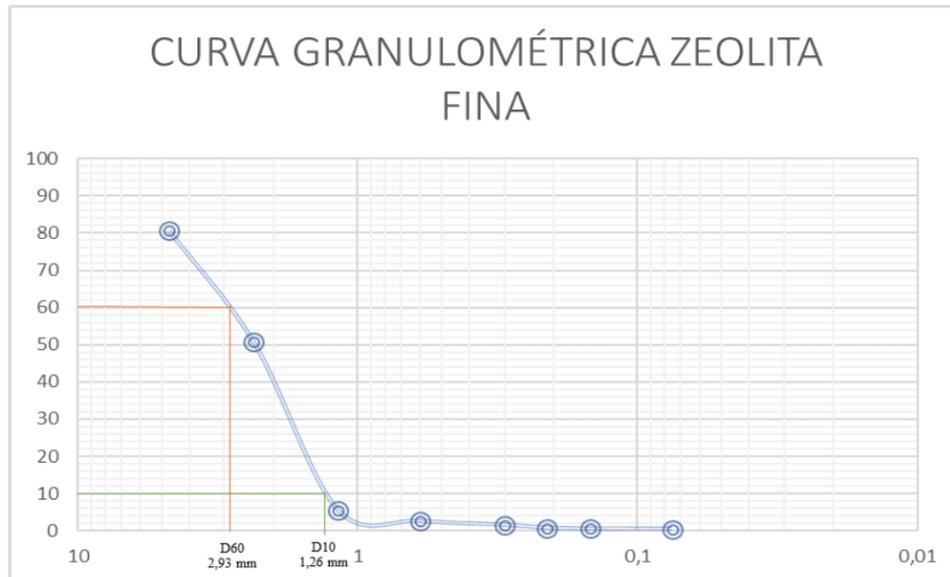
comportamiento es coherente con lo señalado por Huisman y Wood (1974), quienes destacan que la remoción de turbidez es una función secundaria en los filtros lentos de arena.

**Figura 1:** Curva granulométrica para zeolita gruesa.



Elaboración: Propia.

**Figura 2:** Curva granulométrica para zeolita fina.



En conjunto, estos resultados confirman que la combinación de un medio filtrante mixto y el control adecuado de la velocidad de filtración son factores determinantes para maximizar la eficiencia de los filtros lentos de arena en la potabilización de agua subterránea. Además, el uso de materiales locales como la zeolita y la arena fina, junto con una granulometría cuidadosamente seleccionada, refuerza la viabilidad técnica y económica de esta tecnología para su implementación en comunidades rurales con recursos limitados. Por lo tanto, este estudio aporta evidencia sólida que respalda la optimización de filtros lentos de arena como una solución sostenible y eficaz para garantizar el acceso a agua potable de calidad y proteger la salud pública.

## Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación confirman que los filtros lentos de arena constituyen una alternativa eficaz para la remoción de coliformes totales y *E. coli* presentes en el agua subterránea, en concordancia con lo señalado por Huisman y Wood (1974) y Mwabi et al. (2013). La alta eficiencia microbiológica lograda en el filtro mixto (99% de remoción) destaca la importancia de optimizar la granulometría del medio filtrante, tal como lo demuestra la caracterización granulométrica de la arena fina ( $d_{10} = 0,15$  mm,  $Cu = 2,0$ ) y la zeolita utilizada en este estudio. Este hallazgo coincide con los planteamientos de Loganathan et al. (2015), quienes resaltan que los filtros que combinan materiales filtrantes heterogéneos tienden a presentar una mayor retención de partículas y microorganismos debido a la mejora en la distribución de poros y a la formación más eficiente de la *schmutzdecke*.

Asimismo, la disminución de la eficiencia de remoción observada al aumentar la velocidad de filtración de 0,1 a 0,3 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h respalda la hipótesis de que las velocidades más bajas favorecen el tiempo de contacto y el desarrollo biológico en la *schmutzdecke*, lo que incrementa la retención de microorganismos patógenos. Este comportamiento fue consistente con los resultados obtenidos por Jain et al. (2020), quienes demostraron que a velocidades de filtración bajas se promueve un equilibrio adecuado entre la filtración física y la actividad biológica, optimizando la calidad del agua filtrada. En contraste, las velocidades altas reducen el tiempo de contacto y pueden provocar el desprendimiento de la *schmutzdecke*, afectando negativamente la eficiencia microbiológica y aumentando la turbidez del efluente.

Por otra parte, la reducción de la turbidez en aproximadamente un 70% confirma la capacidad de los filtros lentos de arena para retener sólidos suspendidos, aunque este parámetro no mostró

variaciones significativas entre las diferentes configuraciones de filtro. Este hallazgo coincide con lo señalado por Huisman y Wood (1974), quienes indicaron que la remoción de turbidez en filtros lentos es un proceso secundario en comparación con la remoción de microorganismos. Sin embargo, es importante destacar que la reducción de turbidez contribuye a la aceptabilidad sensorial del agua y a su calidad general para el consumo humano, por lo que representa un valor agregado de este sistema de tratamiento.

Cabe mencionar que el desarrollo homogéneo de la *schmutzdecke* observado en el filtro mixto operado a velocidades bajas fue un factor determinante para alcanzar altos porcentajes de remoción de coliformes totales. Este resultado coincide con las observaciones de Mwabi et al. (2013), quienes documentaron que la estabilidad y la densidad de la *schmutzdecke* son indicadores clave de la eficiencia microbiológica de los filtros lentos de arena. Por lo tanto, se recomienda implementar programas de monitoreo de la *schmutzdecke* y prácticas de mantenimiento que aseguren su adecuada formación y preservación, evitando intervenciones innecesarias que puedan comprometer su funcionamiento

Por último, los hallazgos de esta investigación demuestran que la optimización de los parámetros de diseño —como la selección granulométrica del medio filtrante y el control de la velocidad de filtración— son aspectos fundamentales para garantizar la eficiencia de los filtros lentos de arena en la potabilización de agua subterránea en comunidades rurales. Además, el uso de materiales alternativos como la zeolita, combinado con un enfoque de operación cuidadosa, puede potenciar el rendimiento de estos sistemas y contribuir a la sostenibilidad de la solución propuesta. Estos resultados refuerzan la viabilidad técnica y económica de los filtros lentos de arena como estrategia de tratamiento descentralizado en el contexto ecuatoriano y en escenarios similares en países en desarrollo.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos en el recinto San José demuestran que los filtros lentos de arena, particularmente en su configuración mixta de arena y zeolita, constituyen una alternativa eficaz y sostenible para la potabilización de agua subterránea destinada al consumo humano. La remoción de coliformes totales cercana al 100% a velocidades de filtración bajas ( $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ ) confirma la viabilidad técnica de esta tecnología para cumplir con la Norma INEN 1108 y garantizar la seguridad sanitaria del recurso hídrico.

El estudio también confirma que la granulometría del medio filtrante y la velocidad de filtración son parámetros determinantes para la eficiencia microbiológica del sistema. El empleo de un medio filtrante mixto, con arena fina ( $d_{10} = 0,15$  mm,  $C_u = 2,0$ ) y zeolita, favorece el desarrollo de la schmutzdecke y mejora la retención de microorganismos, lo que refuerza la robustez del filtro y su adaptabilidad a las condiciones locales.

Sin embargo, se observa que al incrementar la velocidad de filtración a  $0,3$  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/h, la eficiencia de remoción disminuye significativamente, evidenciando la necesidad de operar los filtros lentos de arena a velocidades controladas que prioricen la calidad del agua tratada sobre la cantidad de producción.

Finalmente, la optimización de filtros lentos de arena, a partir de la combinación de materiales filtrantes locales y el control de los parámetros de diseño, representa una solución replicable y de bajo costo para mejorar la calidad microbiológica del agua subterránea en comunidades rurales. Este enfoque contribuye al cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible relacionados con el acceso a agua potable segura y la protección de la salud pública.

## Referencias

1. American Public Health Association (APHA). (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater. APHA.
2. Caraballo, J., & Xavier, R. (2017). Contaminación del agua subterránea: fuentes y prevención. Editorial Científica.
3. Cerón, J., Gutiérrez, J., & Torres, L. (2021). Contaminación microbiana en aguas subterráneas: causas y soluciones. *Revista Agua y Salud Ambiental*, 12(3), 45-53.
4. Gallegos Maridueña, P. T. (2023). Diseño de un tratamiento de potabilización para agua subterránea empleada como fuente de consumo humano en el recinto San José, cantón Naranjito, provincia del Guayas [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
5. Guanilo, M. E., Tovar, J. A., & Díaz, R. M. (2021). Calidad microbiológica del agua subterránea y riesgo sanitario en áreas rurales. *Revista de Salud Ambiental*, 34(1), 12-21.
6. Huisman, L., & Wood, W. E. (1974). Slow sand filtration. World Health Organization.
7. Jain, P., Pradeep, R., & Gupta, S. (2020). Influence of particle and grain size on sand filtration. *Applied Science and Technology*, 10(2), 112–122.

8. Loganathan, P., Vigneswaran, S., Kandasamy, J., & Bolan, N. (2015). Removal and recovery of nutrients from wastewater using slow sand filters. *Environmental Technology Reviews*, 4(1), 19–35.
9. Muhammed, I., Shetty, A., & Katti, D. (1996). Biological layer development and regeneration in slow sand filters. *Water Science & Technology*, 33(7), 39–46.
10. Mwabi, J. K., Mamba, B. B., & Momba, M. N. B. (2013). Removal of turbidity and *E. coli* by household water treatment filters: Comparison between ceramic, biosand and slow sand filters. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 48(2), 167–175.
11. Organización Mundial de la Salud (OMS). (2018). Guías para la calidad del agua potable. OMS.
12. Ruiz, R. L., & González, A. P. (2019). Vulnerabilidad de los acuíferos y contaminación bacteriana. *Revista Agua y Saneamiento Rural*, 5(1), 20–28.

© 2025 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).