



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

# LICENCIATURA EN CIENCIAS AMBIENTALES

Escuela Nacional de Estudios Superiores,  
Unidad Morelia

EVALUACIÓN DE UN FILTRO DE BIOARENA  
PARA LA OBTENCIÓN DE AGUA PARA USO  
HUMANO

# TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES

P R E S E N T A

CITLALI BERENICE NUÑEZ GUIZAR

DIRECTOR(A) DE TESIS: M en C. Benjamín Villalobos Castañeda

CODIRECTOS DE TESIS: Dr. Carlos García Bustamante

MORELIA, MICHOACÁN

FEBRERO, 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



ESCUELA  
NACIONAL  
DE ESTUDIOS  
SUPERIORES  
UNIDAD MORELIA

10  
años  
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO ESCUELA  
NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA  
SECRETARÍA GENERAL  
SERVICIOS ESCOLARES

**MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE**

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

**P R E S E N T E**

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 08** del **Comité Académico de la Licenciatura en Ciencias Ambientales** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, celebrada el día **30 de octubre de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Citlali Berenice Nuñez Guizar** de la Licenciatura en **Ciencias Ambientales**, con número de cuenta **419125420**, con el trabajo titulado: "**Evaluación de un filtro de bioarena para la obtención de agua para uso humano**", bajo la dirección como tutor del **M. en C. Benjamín Villalobos Castañeda** y como co-tutor el **Dr. Carlos Alberto García Bustamante**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

<b>Presidente:</b>	M. en C. Neftalí Razo Pérez
<b>Vocal:</b>	Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva
<b>Secretario:</b>	M. en C. Benjamín Villalobos Castañeda
<b>Suplente:</b>	M. en C. Héctor Edgar Castelán Martínez
<b>Suplente:</b>	M. en C. Rosa María Gallardo Álvarez

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Morelia, Michoacán a 07 de febrero de 2024.

**DRA. YUNUEN TAPIA TORRES**  
SECRETARIA GENERAL

---

**CAMPUS MORELIA**

Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta  
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)5623.7300, Extensión Red UNAM: 80614  
[www.enesmorelia.unam.mx](http://www.enesmorelia.unam.mx)

### *Agradecimientos institucionales*

Agradezco a la Licenciatura en Ciencias Ambientales de la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia de la Universidad Nacional Autónoma de México por abrirme sus puertas y brindarme los conocimientos para formarme profesionalmente. A la institución por la beca de licenciatura otorgada, Beca de Titulación-Alto rendimiento, para la conclusión de este proyecto.

Al M en C. Benjamín Villalobos Castañeda por su papel fundamental como tutor en la realización de este trabajo, por su dedicación y paciencia en cada asesoría, por su interés y apoyo para guiar mis ideas. Gracias por su retroalimentación y por todas las facilidades brindadas para la elaboración y conclusión de la tesis en todas sus etapas.

Al Dr. Carlos Alberto García Bustamante por su papel fundamental como cotutor de este trabajo. Le agradezco por brindarme siempre los medios suficientes para llevar a cabo todas las actividades de este proyecto y por abrirme las puertas al Laboratorio de Ecotecnologías en la ENES Morelia. Gracias por su colaboración a través de revisiones y consejos para el presente escrito.

Al M en C. Neftalí Razo Pérez, responsable del Laboratorio de Química de la ENES Morelia por el espacio y los recursos brindados en el laboratorio para la realización de este trabajo. Agradezco por formar parte del jurado revisor, por sus comentarios y su disponibilidad en las sesiones de laboratorio.

A los miembros del jurado la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva, al M. en C. Héctor Castelán Martínez y a la M en C. Rosa María Gallardo Álvarez por el tiempo dedicado en la revisión de la tesis y sus comentarios para el enriquecimiento de esta tesis.

Al Dr. Orlando Hernández Cristóbal, responsable del Laboratorio de Microscopía de la ENES Morelia; por su contribución en los análisis de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para la observación del desarrollo de la biocapa.

Al Dr. Rigoberto Juárez López, investigador de la Unidad del Instituto de Materiales por la realización del análisis de Difracción de Rayos X para determinar la composición química de la marmolina.

Al personal de Servicios Generales de la ENES, Unidad Morelia, a los arquitectos Miguel Ángel García Pérez (superintendente de obra), Rafael Manríquez Barragán (jefe de área), José Manuel Madrigal Flores (arquitecto residente), por las facilidades brindadas para realizar la toma de muestras de agua proveniente de la presa dentro de las instalaciones.

### *Agradecimientos personales*

Agradezco a mis padres, Roberto y Mercedes, este logro es un testimonio de su inmenso amor, dedicación y esfuerzo para asegurarme una educación. Gracias por ser los faros en mi vida, por no dejar de creer en mí y brindarme todo cuanto han podido.

A mis hermanos, Xóchitl, Alejandro y Roberto, por ser mi apoyo incondicional, por acompañarme, cuidar de mí y motivarme. Gracias por siempre escucharme y ser ese soporte para continuar.

A mi primo, el Arq. Patrocinio García Núñez por su apoyo en la construcción del filtro y sus consejos para su instalación.

A la Sra. Paulina Jiménez, artesana de la localidad de Amatenango del Valle, Chiapas por elaborar el contenedor de barro para este filtro de bioarena.

A Jennifer, Daniela, Abril, Analía y Yennifer, por su amistad durante la licenciatura. Gracias por apoyarnos mutuamente en nuestra formación profesional.

A Jacob, por siempre escucharme, darme palabras de aliento y motivarme cada día. Agradezco por acompañarme durante el proceso, por sus consejos y enseñarme tanto.

A mis tutores, el M. en C. Benjamín Villalobos y el Dr. Carlos García, por su paciencia, enseñanzas y guías durante todo este proceso. Agradezco su dedicación y compromiso con mi proyecto, junto con su habilidad para guiar mis ideas y dar forma a mis investigaciones. No solo me ayudaron a crecer académicamente sino también como persona.

# ÍNDICE

<b>RESUMEN</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>2</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	4
1.2 OBJETIVOS	4
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
<b>2. ANTECEDENTES</b>	<b>5</b>
<b>3. MARCO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
3.1. PANORAMA GENERAL: LA PROBLEMÁTICA DEL ACCESO AL AGUA	7
3.2. CALIDAD DEL AGUA	9
3.2.1. Parámetros para evaluar la calidad de agua	10
3.3. SITUACIÓN DE ECOTECNIAS PARA LA FILTRACIÓN DE AGUA EN MÉXICO	13
3.4. TECNOLOGÍAS POINT OF USE (POU)	16
3.5. MECANISMOS DE FILTRACIÓN	18
3.6. FILTROS DE BIOARENA	19
3.6.1. Modelo y componentes	20
3.6.2. Medio filtrante, capa amortiguadora y de drenaje	21
3.6.3. Tipo de agua a tratar	22
3.6.4. Biocapa	24
3.6.5. Tasa de filtración	26
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>27</b>
4.1. SITIO DE ESTUDIO	28
4.2. DISEÑO DEL FILTRO DE BIOARENA	29
4.3. ELECCIÓN Y PREPARACIÓN DE LOS MEDIOS	32
4.4. TAMIZADO DE LA ARENA Y GRAVA	34
4.5. LAVADO Y ESTERILIZACIÓN DE LOS MATERIALES	35
4.6. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	36
4.7. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN DEL FILTRO.	36
4.8. PARÁMETROS DE DISEÑO	38
4.9. ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA	39
4.10. TASAS DE ELIMINACIÓN	46
4.11. ESTUDIO DE LA FORMACIÓN DE LA BIOCAPA	46
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>48</b>
5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X	48
5.2. PARÁMETROS DE DISEÑO	48
5.3. ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA	50
5.4. ANÁLISIS DE LA BIOCAPA CON MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO	63
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>
<b>7. RECOMENDACIONES</b>	<b>68</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>69</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO II</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

TABLA 3.1 ESTUDIOS QUE EVALUARON EL RENDIMIENTO DE FILTROS DE ARENA .....	23
TABLA 4.1 RESULTADOS DEL MUESTREO EN LA PRESA COINTZIO; AGUAS ABAJO, SANTIAGO UNDAMEO, EN TEMPORADA DE LLUVIAS (CAZARES 2020) .....	28
TABLA 4.2 CANTIDAD DE MATERIAL NECESARIO PARA EL FILTRO .....	32
TABLA 4.3 PROPIEDADES DEL DISEÑO Y LLENADO DEL FILTRO CON MATERIALES.....	37
TABLA 4.4 PARÁMETROS Y MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS DE CALIDAD DE AGUA .....	40
TABLA 4.5 DISEÑO DE MUESTREO Y ANÁLISIS DE AGUA ENTRADA /SALIDA .....	40
TABLA 5.1 CARACTERIZACIÓN EL AGUA DE LA PRESA COINTZIO, COMPARADA CON EL AGUA DEL REGISTRO DE MANTENIMIENTO DE LA ENES .....	50
TABLA 5.2 RESULTADOS DE PARÁMETROS FISCOQUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EN EL FBA.....	51
TABLA 5.3 RESULTADOS OBTENIDOS DE EVALUACIÓN DE SÓLIDOS.....	60
FIGURA 3.1 TECNOLOGÍAS PARA LA PURIFICACIÓN DEL AGUA A) MESITA AZUL DISEÑADA POR CÁNTARO AZUL. OBTENIDA DE: <a href="https://www.cantaroazul.org/tecnologias">HTTPS://WWW.CANTAROAZUL.ORG/TECNOLOGIAS</a> B) LLAVEOZ EN UNA COMUNIDAD RURAL IMPLEMENTADA POR GRUPO EOZ. OBTENIDA DE: <a href="https://ecotec.unam.mx/ecoteca/">HTTPS://ECOTEC.UNAM.MX/ECOTECA/</a> .....	15
FIGURA 3.2 MAPA INTERACTIVO DE TECNOLOGÍAS WASH EN MÉXICO PUBLICADO POR CAWST: <a href="https://www.hwts.info/projects">HTTPS://WWW.HWTS.INFO/PROJECTS</a> 15	
FIGURA 3.3 MODELO Y COMPONENTES DE UN FILTRO DE BIOARENA (CAWST, 2012). .....	20
FIGURA 4.1 METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL RENDIMIENTO DEL FBA .....	27
FIGURA 4.2 MAPA DEL SITIO DE ESTUDIO .....	29
FIGURA 4.3 DIMENSIONES Y ESTRUCTURA DEL FILTRO DE BIOARENA .....	32
FIGURA 4.4 TAMICES CON DIFERENTES APERTURAS DE MALLA: A) 1 CM; B) 0.5 CM, C) 1 MM .....	34
FIGURA 4.5 TAMIZADO DE LA GRAVA Y MARMOLINA. A) SEPARACIÓN DE GRAVA GRUESA ENTRE 1.0 A 0.5 CM; B) SEPARACIÓN DE GRAVA FINA ENTRE 0.5 A 0.1 CM; C) SEPARACIÓN DE MARMOLINA ENTRE 0.25 MM .....	34
FIGURA 4.6 LAVADO DE MATERIALES. A) GRAVA B) MARMOLINA .....	35
FIGURA 4.7 ESTERILIZACIÓN DE LOS MATERIALES EN BAÑO MARÍA DIGITAL. A) MARMOLINA B) GRAVA .....	35
FIGURA 4.8 FILTRO DE BARRO Y SU CREADORA PAULINA JIMÉNEZ.....	37
FIGURA 4.9 DIFUSOR PARA DISTRIBUIR LA SALIDA DEL AGUA SOBRE LA MARMOLINA .....	37
FIGURA 4.10 INSTALACIÓN DEL FILTRO. A) COLOCACIÓN DE LA GRAVA CON LA TERGALINA. B) VACIADO DE LA MARMOLINA. C) FILTRO INSTALADO .....	38
FIGURA 4.11 RECOLECCIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA PROVENIENTE DE LA PRESA EN UN REGISTRO DE MANTENIMIENTO UBICADO EN LA ENES MORELIA. A) UBICACIÓN DEL REGISTRO. B) TOMA DE MUESTRA. C) RECOLECCIÓN. ....	39
FIGURA 4.12 DETERMINACIÓN DE COLIFORMES POR MEDIO DE PLACAS PETRIFILM.....	41
FIGURA 4.13 DETERMINACIÓN CON MULTIPARAMÉTRICO HACH HQ 30D .....	42
FIGURA 4.14 EVALUACIÓN DE TURBIDEZ MEDIANTE TURBÍMETRO PORTÁTIL MARCA WTW MODELO PHOTOFLEX® TURB.....	42
FIGURA 4.15 DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL. A) MONTAJE DEL EQUIPO DE TITULACIÓN; B) VIRE DEL COLOR ROSA A AZUL PRODUCIDO POR EL INDICADOR ERIOCROMO NEGRO T.....	43

FIGURA 4.16 DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD. A) MONTAJE DEL EQUIPO DE TITULACIÓN; B) VIRE DEL COLOR AMARILLO A NARANJA CANELA PRODUCIDO POR EL INDICADOR ANARANJADO DE METILO. ....	44
FIGURA 4.17 BOTELLAS OxiTOP PARA PRUEBA DE DBO5 .....	45
FIGURA 4.18 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES. A) MONTAJE DE EQUIPO DE FILTRACIÓN MILLIPORE. B) MEMBRANAS MILLIPORE CON SÓLIDOS SUSPENDIDOS. C) CRISOL EN LA MUFLA. ....	45
FIGURA 4.19 TOMA DE MUESTRA DE LA BIOCAPA. A) TOMA DE MUESTRA DE MARMOLINA CON UNA ESPÁTULA. B) VIAL CON LA MUESTRA EN ALCOHOL 70%. ....	47
FIGURA 4.20 PREPARACIÓN DE LA MUESTRA DE LA BIOCAPA PARA SU OBSERVACIÓN EN SEM. A) SECADOR DE PUNTO CRÍTICO. B) MONTAJE DE LAS MUESTRAS EN CINTA DE CARBONO DE DOBLE CARA. C) RECUBRIMIENTO CON ORO. ....	47
FIGURA 5.1 DIFRACTOGRAMA DE RAYOS X DE LA MARMOLINA .....	48
FIGURA 5.2 COMPORTAMIENTO DEL CAUDAL.....	49
FIGURA 5.3 COMPORTAMIENTO DE LA TASA DE FILTRACIÓN .....	49
FIGURA 5.4 COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS PRUEBAS DEL FBA.....	52
FIGURA 5.5 COMPORTAMIENTO DEL pH EN LAS PRUEBAS DEL FBA.....	53
FIGURA 5.6 COMPORTAMIENTO DE LA SALINIDAD EN LAS PRUEBAS DEL FBA .....	54
FIGURA 5.7 COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA EN LAS PRUEBAS DEL FBA.....	55
FIGURA 5.8 COMPORTAMIENTO DE LA TURBIDEZ EN LAS PRUEBAS DEL FBA.....	56
FIGURA 5.9 COMPORTAMIENTO DE LA DUREZA TOTAL EN LAS PRUEBAS DEL FBA.....	57
FIGURA 5.10 COMPORTAMIENTO DE LA ALCALINIDAD TOTAL EN LAS PRUEBAS DEL FBA. ....	58
FIGURA 5.11 COMPORTAMIENTO DE LA DBO5 EN LAS PRUEBAS DEL FBA .....	59
FIGURA 5.12 PRUEBA PRESUNTIVA A) BLANCO CON MEDIO DE CULTIVO. B) PRUEBA POSITIVA CON BURBUJA DE GAS EN LA CAMPANA DE DURHAM .....	60
FIGURA 5.13 COMPORTAMIENTO DE COLIFORMES EN LAS PRUEBAS DEL FBA. ....	61
FIGURA 5.14 REDUCCIÓN DE COLIFORMES TOTALES .....	61
FIGURA 5.15 COMPORTAMIENTO DE E. COLI EN LAS PRUEBAS DEL FBA.....	62
FIGURA 5.16 RESULTADOS DE PLACAS PETRIFILM. A) PLACA LIMPIA. B) PLACA CON RESULTADOS POSITIVOS DE COLIFORMES (PUNTOS ROJOS) Y E. COLI (PUNTOS AZULES). ....	63
FIGURA 5.17 MICROGRAFÍA DE LOS GRANOS DE MARMOLINA TIEMPO 0.....	63
FIGURA 5.18 ACERCAMIENTO A LA SUPERFICIE DE UN GRANO DE MARMOLINA LIMPIO .....	64
FIGURA 5.19 MICROGRAFIA DE LOS GRANOS DE ARENA TIEMPO 0.....	64
FIGURA 5.20 FRAGMENTACIÓN DE LOS CRISTALES DE LA MARMOLINA .....	65
FIGURA 5.21 MICROORGANISMOS EN LA SUPERFICIE DE LOS GRANOS DESPUÉS DE UN MES DE FUNCIONAMIENTO. EN EL RECUADRO BLANCO SE OBSERVAN MICROORGANISMOS. ....	65
FIGURA 5.22 MICROGRAFÍA DE LA MARMOLINA AL CUARTO MES, EN EL RECUADRO DEL CENTRO SE OBSERVAN MICROORGANISMOS ADHERIDOS.....	66
FIGURA 5.23 MICROGRAFÍA DE SUPERFICIE DE LA MARMOLINA EMBEBIDA POR MATERIAL EXTRACELULAR Y MICROORGANISMOS. ....	66
FIGURA 5.24 MICROGRAFÍA DEL MATERIAL EXTRACELULAR O MUCILAGO SECRETADO POR BACTERIAS QUE ENVUELVE A LOS GRANOS DE MARMOLINA. ....	66



## ***Resumen***

La falta de agua es uno de los grandes retos que afronta la humanidad actualmente, tan sólo en 2016, aproximadamente 8 millones de personas en México carecían de acceso a agua entubada. Bajo este contexto, el filtro de bioarena (FBA) es una de las alternativas más eficaces y prometedoras, gracias a su capacidad para eliminar contaminantes presentes en el agua y su facilidad de construcción con materiales locales. En este trabajo se propone y evalúa un prototipo ecotecnológico de FBA utilizando un recipiente de barro y marmolina como medio filtrante, con el objetivo de obtener agua para uso humano. El diseño se basó en el publicado por la asociación benéfica canadiense: Centro de Tecnología Asequible de Agua y Saneamiento (CAWST, por sus siglas en inglés), el cual se escaló a un 40% de la altura y menos de 40 cm de profundidad del medio filtrante, para obtener dimensiones más compactas y un peso reducido facilitando su transporte y posible adopción.

Para evaluar su diseño y desempeño, se sometió durante cuatro meses a pruebas de filtración utilizando agua de la presa Cointzio, Morelia. La calidad del agua de entrada y salida se evaluó con el análisis de 14 parámetros fisicoquímicos y microbiológicos (pH, salinidad, conductividad eléctrica, temperatura, turbidez, dureza, alcalinidad, sólidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles, coliformes totales y *E. coli*), comparándolos con los estándares normativos del agua potable. Se observó de la formación de la biocapa mediante Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), dado que la mayoría de los procesos de eliminación en el FBA ocurren en esta capa, contribuyendo a la mejora de la calidad del agua.

Los resultados de laboratorio demostraron un buen rendimiento del prototipo de FBA, evidenciando la maduración de la biocapa mediante reducciones en el caudal y micrografías MEB, lo que contribuye a eliminar contaminantes biodegradables y algunos patógenos desde el primer mes. El pH, la alcalinidad, la dureza, la conductividad eléctrica y la salinidad mostraron un aumento después de la filtración, lo cual podría estar relacionado con la composición de la marmolina, sin embargo, no superaron los límites establecidos por la normativa. Por otro lado, se logró la reducción de la turbidez y la DBO<sub>5</sub>, lo que indican una remoción de materia orgánica en el agua. En cuanto a los parámetros microbiológicos, se observó una reducción a lo largo de las pruebas, no obstante, no se logró su eliminación total por lo que se recomienda un método de desinfección adicional para el agua obtenida del FBA.

## *Abstract*

Lack of water is one of the greatest challenges facing humanity today; in 2016 alone, approximately eight million people in Mexico lacked access to piped water. In this context, the bio-sand filter (BSF) is one of the most effective and promising alternatives, thanks to its ability to remove contaminants present in the water and its ease of construction with local materials.

This paper proposes and evaluates an eco-technological prototype of ABW using a clay and marmolina container as a filtering medium, with the objective of obtaining water for human use and that communities in Mexico can replicate it. The design was based on the one published by the Canadian charity: Center for Affordable Water and Sanitation Technology (CAWST), which was scaled to 40% of the height and less than 40 cm deep of the filter media, to obtain more compact dimensions and reduced weight, facilitating its transport and adoption.

To evaluate its design and performance, it was subjected for four months to filtration tests using water from the Cointzio dam, Morelia. The inlet and outlet water quality were evaluated with the analysis of 14 physicochemical and microbiological parameters (pH, salinity, electrical conductivity, temperature, turbidity, hardness, alkalinity, total solids, total dissolved solids, total suspended solids, volatile solids, total coliforms and E. coli), comparing them with the normative standards for drinking water. The formation of the biofilm was observed by Scanning Electron Microscopy (SEM), since most of the removal processes in the FBA occur in this layer, contributing to the improvement of water quality.

Laboratory results showed a satisfactory performance of the FBA prototype, evidencing the maturation of the biofilm through reductions in flow rate and SEM micrographs, which contributes to the removal of biodegradable contaminants and some pathogens from the first month. The pH, alkalinity, hardness, electrical conductivity and salinity showed an increase after filtration, which could be related to the composition of the marmolina, however, they did not exceed the limits established by the regulations. On the other hand, a reduction in turbidity and BOD5 was achieved, indicating a removal of organic matter in the water. As for the microbiological parameters, a reduction was observed throughout the tests, however, their total elimination was not achieved; therefore, an additional disinfection method is recommended for the water obtained from the FBA.

## ***1. Introducción***

Durante mucho tiempo las sociedades del mundo han trabajado con la gestión de los recursos hídricos; gracias al uso eficiente del agua las primeras civilizaciones alcanzaron su esplendor. Sin embargo, las consecuencias del cambio climático y la degradación de los ecosistemas, combinadas con el aumento de la población, la intensificación de la agricultura, la industrialización y la urbanización, han incrementado la demanda de agua limpia para diferentes usos (doméstico, agrícola, energético e industrial) (Vliet et al., 2021), en consecuencia, el acceso al agua limpia es uno de los grandes retos que afronta la humanidad actualmente; presionando a los gobiernos a planificar y gestionar el ciclo del agua, desde la protección de la fuente hasta el acceso y uso del agua, para garantizar la salud y el desarrollo social y económico de la población (Beard & Mitlin, 2021; Vohidovna, 2022).

El acceso al agua y al saneamiento es un derecho humano que confiere beneficios al bienestar humano y puede verse reflejado en la salud, en las perspectivas de medios de vida y la capacidad de acceder a oportunidades educativas. El acceso inadecuado al agua repercute en la salud pública y en el bienestar mental, físico y espiritual de las personas y los hogares (Beard & Mitlin, 2021; Deshpande et al., 2020). El uso de agua no apta para consumo humano puede propagar agentes patógenos y contaminantes nocivos, que a su vez causan diversas enfermedades y síntomas de salud como diarrea, vómito y gastroenteritis. La propagación de estos patógenos puede producirse a través de la ingestión directa, como en el caso de beber o utilizar agua contaminada en la preparación de alimentos, o a través de vías indirectas resultantes de la incapacidad de aplicar prácticas higiénicas. Bajo este contexto, los filtros de bioarena son una alternativa que reduce el riesgo de (re)contaminación durante el transporte y almacenamiento del agua (Mostafa et al., 2021a).

El presente trabajo consiste en la elaboración y evaluación de un filtro de bioarena para limpiar agua superficial (río, arroyo, lago). Para su construcción, se emplean materiales alternativos de fácil acceso y bajo costo, como lo son: un recipiente cilíndrico de barro en lugar de cemento o plástico, la marmolina como medio filtrante, sustituyendo la arena sílica comúnmente empleada en estos filtros, y accesorios de PVC típicos de instalaciones hidráulicas. Es importante mencionar que al cumplir el primer mes de experimentación el recipiente de barro presentó una fuga en una grieta atribuida a defectos en la fabricación.

## ***1.1 Preguntas de investigación***

- ¿Se puede mejorar la calidad del agua de la muestra problema en sus parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos mediante el uso del FBA?
- ¿El contenedor de barro y la marmolina representan opciones efectivas como recipiente y medio filtrante para el FBA?
- ¿Se puede formar la biocapa en el FBA y con ella eliminar coliformes totales y *E. Coli* en la muestra problema?

## ***1.2 Objetivos***

Objetivo General: Diseñar, construir, evaluar un prototipo de filtro de bioarena para agua mediante la determinación de parámetros de calidad de agua de entrada y salida, así como su diseño, funcionamiento y rendimiento, para la obtención de agua para uso humano. De manera que el filtro sirva como propuesta para comunidades que tienen acceso a un cuerpo natural de agua pero que no cuentan con la tecnología para obtener agua limpia.

Objetivo particular 1. Evaluar la calidad del agua de entrada y de la filtrada obtenida del prototipo de FBA mediante la determinación de parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos.

Objetivo particular 2. Estudiar la formación de la biocapa, su desarrollo en el tiempo, así como su relación con la calidad de agua obtenida.

Objetivo particular 3. Caracterizar y evaluar los nuevos materiales propuestos para la elaboración del prototipo de FBA.

## ***1.3 Justificación***

Monitorear el desempeño de estos filtros es crucial para suministrar agua segura en zonas donde el acceso al recurso es nulo o de mala calidad. Esta tecnología puede ser una alternativa al tratamiento del agua debido a su efectividad, simplicidad de operación, facilidad de construcción y potencial uso de materiales locales. La optimización de los periodos de maduración y la evaluación del tiempo de formación de la biocapa, cuando se tratan aguas subterráneas y cuerpos de agua superficiales, puede aumentar la eficiencia de los FBA en las primeras semanas de uso (Espinosa Bouchot & Vázquez Villanueva, 2011). El proyecto

puede ser una guía que contribuya en la instalación y operación de filtros de arena, al ser una alternativa que se lleva a cabo con métodos básicos, pero al eficientizar su rendimiento se esperaría beneficios a una mayor escala y, a su vez ser una estrategia que pueda promover, fomentar y sensibilizar el uso adecuado del agua.

En la literatura se encuentra una comprensión limitada de la relación exacta entre la eficiencia de eliminación de los microorganismos del FBA y parámetros como la velocidad del fluido, el tamaño del grano, la profundidad del lecho de arena, la temperatura y la maduración de la biocapa (también denominada Schmutzdecke). Pocos estudios han informado sobre el rendimiento de la calidad del agua, enfocándose en la reducción de turbidez y eliminación de bacterias indicadoras, sin relacionar los parámetros de calidad de agua con el diseño del filtro y la formación de la biocapa (Lynn et al., 2013), además existen pocos modelos matemáticos relevantes para desarrollar una relación precisa entre la eliminación de contaminantes dañinos y sus condiciones de operación (Phillips & Smidt, 2020). De igual forma, otros estudios comenzaron a evaluar diferentes materiales de construcción en la estructura del filtro como el plástico, cloruro de polivinilo modificado (MPVC), acrílico (Sabogal-Paz et al., 2020; Young-Rojanschi; Madramootoo, 2014) y el hierro galvanizado (Smith, 2013). No obstante, el material ideal debe tener en cuenta las características socioeconómicas de las comunidades destinatarias.

Bajo este contexto, este trabajo propone la elaboración un filtro considerando materiales locales o de fácil acceso para que, por ejemplo, comunidades en México puedan replicarlo. Se plantea un recipiente de barro, un material popular en la cultura mexicana y una alternativa sustentable en comparación con el cemento y el plástico que, a su vez, apoya el trabajo realizado por artesanos. Se eligió la marmolina como nuevo medio filtrante al ser un material de fácil acceso, el cual se puede conseguir en las casas de materiales y ferreterías , asimismo, se plantea evaluar su eficacia para uso en los filtros de bioarena.

## ***2. Antecedentes***

La historia de los filtros de bioarena con funcionamiento intermitente comienza a principios del siglo XIX, estos primeros filtros se utilizaban principalmente para eliminar la turbidez y son la base de toda la tecnología de filtración de arena que se utiliza en la actualidad. El primer filtro lento de arena (FLA) identificable fue construido en 1804 por John Gibb para

suministrar agua limpia a su negocio de blanqueo y vendió el agua sobrante a los habitantes de Paisley, Escocia. La filtración para el abastecimiento doméstico empezó en 1829 cuando James Simpson construyó filtros para la Chesla Water Co. que abastecía partes de Londres. Este filtro fue el primero de su clase y sentó las bases de la práctica actual de filtración lenta con arena, demostrando las ventajas de filtrar el agua. Los beneficios para la salud y la mejora estética de la filtración del agua provocaron la expansión de los filtros lentos de arena a Europa continental. El primer filtro lento de arena para el suministro público de agua en Estados Unidos fue diseñado por James Kirkwood e instalado en 1872 en la ciudad de Poughkeepsie, Nueva York. Sin embargo, la historia de la filtración lenta en arena en EE. UU. ha sido de aceptación reticente, debido a que los filtros lentos de arena requieren grandes extensiones de terreno para alojar las instalaciones de tratamiento (Buzunis, 1995; Simoni Balen, 2018).

La alta eficacia documentada de un filtro de arena lento, y su relativa sencillez de uso y funcionamiento, hacen de este método una tecnología atractiva para la purificación del agua en zonas rurales y remotas de las regiones en desarrollo del mundo. Los filtros de arena lento tradicionales suelen ser lo bastante grandes como para abastecer a toda una comunidad y dependen de una entrada continua de agua bruta para suministrar los nutrientes y el oxígeno necesarios para mantener viva la capa biológica. A partir de estos primeros filtros a gran escala evolucionaron las formas actuales de filtración basada en medios granulares. La necesidad de un filtro de funcionamiento intermitente fue observada por muchos, pero, no se realizó una adaptación exitosa del proceso continuo de filtración de arena lenta hasta que David Manz desarrolló el diseño de un filtro lento de arena que era lo suficientemente pequeño como para ser utilizado en un solo hogar, y proporcionar agua suficiente para el hogar cuando se utiliza de forma intermitente en lugar de continua. En 1995, Byron Buzunis, entonces estudiante de máster que trabajaba con el Dr. Manz, realizó la primera investigación bien documentada del filtro lento de arena de funcionamiento intermitente a escala doméstica, que más tarde se conocería como BioSand Filter o Filtros de Bioarena (FBA) (Vanderzwaag, 2008).

Trabajos recientes han incorporado varios intentos para mejorar el rendimiento de la filtración por arena, en cuanto a la eliminación de microbios y turbidez. Estos incluyen, la adición de hierro, como clavos no galvanizados en la cuenca del difusor (Napotnik et al.,

2021); el uso de biocarbones y arcilla bentonita (Emslie et al., 2022; Guan et al., 2020); nanoarcillas y cáscara de arroz como medio filtrante (Morantes et al., 2018); la adición de una etapa de pretratamiento y desinfección en el filtro y el aumento del área de la biocapa (Phillips & Smidt, 2020) que mejoró el rendimiento general en términos de eliminación de contaminantes, ya que particularmente para las bacterias, el contacto con la biocapa es el mecanismo de filtración más notable en el FBA.

Los contenedores utilizados en proyectos de campo suelen ser de hormigón y pueden variar en su altura hidráulica máxima, profundidad de la columna de arena y volumen del espacio de cabeza en mayor o menor grado respecto a las especificaciones originales de los contenedores de plástico (Jenkins et al., 2011).

### ***3. Marco teórico***

#### ***3.1. Panorama general: la problemática del acceso al agua***

El concepto de escasez de agua ha sido objeto de debate durante algún tiempo y es relativamente complejo de determinar, ya que es impulsada por una combinación de tres fuerzas principales, agotamiento y degradación del recurso, crecimiento de la población y distribución o acceso desigual (Mukheibir, 2010; Rijsberman, 2006).

En 2010 la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU, 2010a) y del Consejo de Derechos Humanos (ONU, 2010b) reconoció el derecho humano al acceso al agua potable y el saneamiento. Cinco años más tarde, se estableció el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6, con el fin de garantizar la disponibilidad y el saneamiento del agua para todos y mejorar la calidad de vida de miles de millones de personas en todo el mundo. No obstante, la falta de agua, saneamiento e higiene (WASH) es catalogada como uno de los mayores riesgos globales durante la próxima década y una preocupación que manifiesta las desigualdades sociales y económicas.

La falta de acceso al agua potable contribuye de forma significativa a la carga mundial de enfermedades y muertes, derivadas de la diarrea infecciosa y otras enfermedades entéricas, así como sus secuelas y efectos indirectos sobre la salud, como los síndromes neurológicos, la artritis reactiva, la desnutrición y la detención del crecimiento y el desarrollo. La carga de las enfermedades relacionadas con el agua varía según el contexto y es mayor en los entornos

de bajos ingresos, donde la diarrea sigue siendo una de las principales causas de muerte infantil (Bain et al., 2014; Santos et al., 2016).

En 2020, alrededor de una de cada cuatro personas carecía de una fuente de agua gestionada de forma segura en su hogar y casi la mitad de la población mundial no tenía acceso a servicios de saneamiento. Incluso las personas que tienen acceso a suministros de agua, como conexiones domésticas, tuberías públicas y pozos de sondeo, pueden no tener agua microbiológicamente segura (UNICEF, 2021; Sobsey et al., 2008). De acuerdo con Tzanakakis et al. (2020), más de 2 mil millones de personas viven en regiones que experimentan un alto estrés hídrico; más de mil millones de personas no tienen acceso a agua potable limpia y segura; alrededor de 3.4 millones de personas mueren cada año debido al uso de agua contaminada; millones de mujeres y niños dedican varias horas al día a recoger agua desde una distancia media de 6 km.

Los informes del Programa de Monitoreo Conjunto indican que sólo el 43% de la población mexicana tiene acceso a sistemas de agua potable gestionados de forma segura y libre de contaminación (UNICEF & WHO, 2019). En 2016, un total de 2,010,000 hogares no tenían acceso al agua corriente en México, lo que representa aproximadamente 8 millones de personas en los 32 estados (Revollo-Fernández & Rodríguez-Tapia, 2021). Ya sea por falta de acceso al agua corriente, por una continuidad inadecuada o por la mala calidad de los servicios, los hogares en México buscan otras fuentes de agua, como agua de pozo, ríos y arroyos que en su mayoría no llevan un tratamiento adecuado para su uso. Así mismo, dada la preocupación por el acceso y la calidad, los residentes de varias localidades o municipios dependen de las cisternas y del agua embotellada para beber, lo que supone un gasto económico adicional para quienes suelen vivir en las zonas más pobres.

En la ciudad de Morelia, pese a contar con fuentes de agua que cubren la demanda, se presentan problemáticas de acceso al agua de índole social, económico y político; contaminación, acceso diferenciado, transitoriedad del servicio, manipulación, deficiente infraestructura, intereses dominantes y fuerzas de poder sobre el agua (García-Estrada et al., 2020). De acuerdo con Ávila, J., & Garduño, V. (2007) los niveles de disponibilidad de agua son complejos, más del 70 % de los 115 pozos (87 de estos profundos) que abastecen la ciudad se encuentran muy por debajo de su producción de agua. Por su parte, el Organismo Operador de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento de Morelia (OOAPAS) reporta que



al menos el 50% del agua distribuida entre las 700 colonias de la ciudad, se desperdicia en fugas de los sistemas hidráulicos, las cisternas y las conexiones defectuosas en las viviendas (Rodríguez, M. B. E., & Barriga, G. M., 2019).

### ***3.2. Calidad del agua***

La calidad del agua es un concepto multifacético que puede aplicarse a una sola característica del agua o, a un grupo de características combinadas en relación con sus usos posibles, ésta se puede clasificar en cuatro categorías: física, química, biológica y radiactiva, cada categoría tiene una serie de parámetros. En términos generales, la calidad de agua se puede definir como las características físicas, químicas y biológicas del agua en relación con su uso previsto para fines tales como el consumo, recreativo, la salud de los ecosistemas y la seguridad de la salud humana (Harrison, 2016; Pond, 2019). La evaluación de la calidad del agua permite determinar su grado de pureza o contaminación y comparar los resultados con los estándares locales e internacionales establecidos para cuerpos de agua naturales y uso humano. Sin embargo, muchos científicos e investigadores tienen dificultades para definir la calidad del agua y presentarla de manera simple y consolidada, debido a la complejidad de los factores o parámetros que afectan la calidad del agua y la variabilidad de los mismos (Sutadian et al., 2015).

La calidad del agua se mide principalmente referente a estándares para parámetros físicos, químicos y biológicos tales como la concentración de oxígeno disuelto, las concentraciones de nutrientes (comúnmente nitrógeno y fósforo), la cantidad de sal (o salinidad) o la cantidad de material suspendido en el agua (turbidez). De acuerdo con Harrison, 2016) los parámetros comúnmente medidos para evaluar la calidad de agua en cuerpos de agua para evaluar la calidad del agua son la temperatura, pH, turbidez, oxígeno disuelto (OD), conductividad y microbiológicos. Monitorear la calidad del agua es crucial para determinar la sostenibilidad y uso del recurso hídrico y/o la tecnología para el tratamiento del agua, así como garantizar la integridad de la salud humana y abordar cualquier problema que pueda surgir. Además, el monitoreo es un requisito previo para implementar políticas de protección de recursos y la asignación óptima de diferentes fuentes de agua según sus usos (Gaytán-Alarcón et al., 2022). Una herramienta para evaluar la calidad del agua son los Índices de Calidad de Agua (ICA), el cual es el resultado de la normalización de parámetros fisicoquímicos seleccionados y a los cuales se les da una ponderación según la importancia a la que se esté dirigiendo. Esta

expresión surge de una combinación compleja de determinados parámetros de calidad de agua; representándose por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o incluso un color (Torres et al., 2009).

Las agencias sanitarias fijan límites a las concentraciones de sustancias químicas y organismos indicadores, de modo que se mantenga un alto nivel de calidad del agua. Las Guías de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para la calidad del agua potable (OMS, 2011) son una de las herramientas que proporcionan criterios basados en la salud para las características fisicoquímicas y microbiológicas de la calidad del agua potable, y ofrecen orientación sobre las formas de tecnología de tratamiento que pueden utilizarse para alcanzar los criterios. No hay un método único que pueda aplicarse de forma universal, las normas sobre el agua de consumo humano pueden diferir, entre los países y regiones, por lo que es fundamental tener en cuenta las leyes vigentes y en proyecto relativas al agua, a la salud y al gobierno local. En México las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que establecen especificaciones, condiciones, parámetros y límites permisibles para el aprovechamiento de agua y descarga de aguas residuales, son los instrumentos que materializan los preceptos constitucionales y la política hídrica nacional (Bailey et al., 2021). La normatividad para agua potable Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, “Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua”, establece los límites permisibles de 55 parámetros e indica que la potabilización del agua, proveniente de una fuente en particular, debe justificarse con estudios de calidad y pruebas de tratamiento a nivel de laboratorio para asegurar su efectividad aplicando los tratamientos que se indican en la misma norma e indicar que de acuerdo con los resultados de las pruebas correspondientes, cuando los contaminantes microbiológicos, las características físicas y los constituyentes químicos del agua excedan los límites establecidos (González Camacho, 2003).

### ***3.2.1. Parámetros para evaluar la calidad de agua***

El agua debe analizarse con diferentes parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, los cuales son características medibles para conocer su calidad y definir su grado de contaminación. Debido a que este trabajo no forma parte de un proyecto de investigación se solicitó apoyo al laboratorio de Química de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), unidad Morelia, el cual cuenta con el equipo y reactivos necesarios para evaluar los 14 parámetros seleccionados (pH, salinidad, conductividad eléctrica (CE), temperatura, Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>), turbidez, dureza total, alcalinidad total, sólidos

totales, sólidos disueltos totales (SDT), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos volátiles totales (SVT), coliformes totales y *E. coli*) los cuales se detallan a continuación.

### **Características físicas:**

- **Temperatura:** controla el ritmo de todas las reacciones químicas y biológicas, sus rangos pueden llevar a la proliferación de algas y la eutrofización, alterar la solubilidad de gases como el oxígeno y dióxido de carbono. La temperatura hace variar también el pH, modificando a su vez la alcalinidad, dureza, CE, salinidad (Bhateria & Jain, 2016).
- **Turbidez:** se utiliza para la eficiencia de los medios de filtrado. Es una medida de la capacidad de la luz para atravesar el agua causada por material en suspensión, se mide con un turbidímetro o nefelómetro, que expresa la turbidez en términos de NTU (Nephelometric Turbidity Unit). El impacto de la turbidez puede resumirse en los siguientes puntos: a) aumenta el costo del tratamiento del agua para diversos usos; b) las partículas pueden servir de escondite a microorganismos nocivos; c) proporciona medios de adsorción para metales pesados como el mercurio, el cromo, el cadmio y muchos contaminantes orgánicos peligrosos (Summers, 2020).
- **Conductividad eléctrica (CE):** capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos. La solubilidad de las sales en el agua depende de la temperatura, por lo que la conductividad varía en conformidad con la temperatura del agua. Además existe una correlación significativa con parámetros como, el valor de pH, la alcalinidad, la dureza total, el calcio, los sólidos totales, los sólidos disueltos totales y la demanda química de oxígeno, el cloruro y la concentración de hierro del agua (Solís-Castro et al., 2018).
- **Salinidad:** esta denominada por cuatro cationes principales calcio, magnesio, sodio y potasio y los aniones principales bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ), carbonato ( $\text{CO}_3$ ), sulfato ( $\text{SO}_4$ ), y cloruro ( $\text{Cl}_2$ ). El contenido de sal del agua se puede detectar fácilmente mediante la medida de los sólidos disueltos totales (TDS) o la conductividad eléctrica (CE) de la solución.
- **Sólidos totales:** los sólidos se encuentran en tres formas: suspendidos, volátiles y disueltos. Los sólidos en suspensión incluyen limo, sedimentos del fondo removidos, materia vegetal en descomposición o efluentes del tratamiento de aguas residuales. Los sólidos en suspensión no atraviesan un filtro, mientras que los disueltos sí. Los sólidos volátiles son aquellos sólidos presentes en el agua u otros líquidos que se pierden al

inflamarse los sólidos secos a 550 °C, es útil para evaluar la cantidad de materia orgánica biológicamente inerte (Bhateria & Jain, 2016). Los sedimentos en suspensión afectan a la calidad del agua al bloquear la transmisión de la luz, alterar la concentración de nutrientes, obstruir los canales y reducir el oxígeno disuelto. (Chawla et al., 2020).

### **Características químicas:**

- pH: factor más importante para determinar la naturaleza corrosiva del agua. En los rangos esperados para aguas crudas o para uso y consumo humano no se tiene efectos directos inmediatos sobre la salud humana. Un pH menos de 7 indica un estado ácido que mantiene metales pesados en solución, favoreciendo la acción corrosiva del agua sobre los sistemas de distribución provocando la destrucción de tuberías y accesorios metálicos (González Camacho, 2003).
- Dureza: término utilizado para expresar las propiedades de las aguas muy mineralizadas. Los minerales disueltos en el agua causan problemas como depósitos calcáreos en las tuberías de agua caliente y dificultad para producir espuma con el jabón. Los iones de calcio y magnesio causan la mayor parte de la dureza en las aguas naturales, entran en el agua principalmente por contacto con el suelo y las rocas. El agua con más de 300 mg/L de dureza se considera generalmente dura, y con menos de 100 mg/L se considera blanda, desde el punto de vista de la salud, la dureza de hasta 500 mg/L es segura, pero más que eso puede causar un efecto laxante (Summers, 2020).
- Alcalinidad: capacidad del agua de neutralizar ácidos. La medición de la alcalinidad del agua es necesaria para determinar la cantidad de cal y sosa necesaria para el ablandamiento del agua. La alcalinidad del agua se debe principalmente a la presencia de iones de hidróxido ( $\text{OH}^-$ ), iones de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), e iones de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), o una mezcla de dos de estos iones en el agua. Los niveles elevados de acidez o alcalinidad en el agua pueden ser un indicio de contaminación industrial o química. La alcalinidad o la acidez también pueden proceder de fuentes naturales, como los volcanes (Summers, 2020).
- Demanda bioquímica de oxígeno ( $\text{DBO}_5$ ): es una medida del oxígeno disuelto consumido por los microorganismos durante la oxidación de sustancias orgánicas en aguas y residuos. La DBO afecta directamente a la cantidad de oxígeno disuelto en ríos y arroyos.

Cuanto mayor es la DBO, más rápidamente se agota el oxígeno en la corriente. Esto significa que hay menos oxígeno disponible para las formas superiores de vida acuática.

### **Características microbiológicas:**

- Organismos coliformes totales: los coliformes totales no son un índice de contaminación fecal o riesgo para la salud, pero pueden proporcionar información básica sobre la calidad del agua de origen. Los coliformes totales son utilizados como una medida microbiana de la calidad del agua potable, en gran parte porque son fáciles de detectar en el agua. Si se usa como un indicador de la eficiencia de un tratamiento, las bacterias coliformes totales no deberían ser detectables en el agua que sale de una planta de tratamiento y, en tales casos, necesita acciones correctivas (OECD & Organization, 2003). Actualmente, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha fijado unos límites de no más de 10 bacterias coliformes en una muestra estándar de 100 ml de agua y de no más de 100 coliformes fecales en una muestra de 100 ml (Bailey et al., 2021)
- *Escherichia coli* (*E. coli*): su presencia indica que el agua puede estar contaminada con heces fecales humanas o de animales. *E. coli* es un miembro taxonómicamente bien definido de la familia *Enterobacteriaceae* y se caracteriza por la posesión de las enzimas  $\beta$ -galactosidase y  $\beta$ -glucuronidase. Es ampliamente referido como índice de contaminación fecal. También es un indicador ampliamente utilizado de la eficacia de un proceso de tratamiento (OECD & Organization, 2003). La OMS afirma claramente que "*E. coli* no debe estar presente en el agua destinada al consumo humano" (OMS, 2006)

### **3.3. Situación de ecotecnias para la filtración de agua en México**

Las ecotecnologías son dispositivos, métodos y procesos que tienen la capacidad de establecer relaciones de cohesión entre los participantes y una relación armónica con el ambiente; las cuales brindan beneficios sociales y económicos en pro de la sostenibilidad donde se prioriza la satisfacción de necesidades humanas básicas y la adecuación de la tecnología a los contextos locales (Ortiz-Moreno et al., 2014). Las ecotecnologías inciden de manera positiva en muchos aspectos relacionados con expansión de libertades y el empoderamiento, por ejemplo, mejorando las condiciones de vivienda, suministrando agua limpia o energía, sin comprometer las condiciones de salud de los usuarios y mejorando o

potenciando las insuficientes oportunidades que tienen algunas personas (Ortiz, Malagón y Masera, 2015).

Ortiz-Moreno et al. (2014) sugieren una categorización de ecotecnias de acuerdo con usos finales o tareas específicas de las tecnologías con respecto a la satisfacción de necesidades humanas básicas. La clasificación considera cinco ejes fundamentales para el bienestar humano: agua, energía, vivienda, manejo de residuos y alimentación. En términos operativos, para cada necesidad se puede definir una serie de tareas o usos específicos. Para resolver la necesidad de agua se requiere un proceso que involucre su obtención, almacenamiento y purificación.

En México existe una gran diversidad de experiencias ecotecnológicas locales y regionales, varias de las iniciativas nacionales cuentan con reconocimiento internacional y están sustentadas en años de trabajo con la población local (Moreno et al., 2015). Moreno et al. (2014) reportan algunas instituciones y asociaciones que han desarrollado proyectos en torno al aprovechamiento del agua así como su purificación, entre ellas se menciona al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), la Asociación Internacional de Sistemas de Captación de Agua de Lluvia (IRCSA, por sus siglas en inglés), instancias gubernamentales como la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SAGARPA), Isla Urbana, el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Agencia de Desarrollo Rural (ITAGRO).

Por otro lado, algunas instituciones que han trabajado con el tema de purificación son CIDECALLI-CP con el diseño y construcción de un sistema de captación, almacenamiento, purificación y envasado de agua de lluvia en la zona mazahua, la Fundación Cántaro Azul desarrolló la Mesita Azul (Fig. 3.1 a), un sistema de desinfección de agua con luz ultravioleta y Grupo EOZ conformada por EOZ S.A. de C.V. y el Instituto de Tecnologías Rurales A.C, la primera se encarga del desarrollo, fabricación y venta de purificadores de agua y la segunda de la capacitación y la distribución de purificadores en comunidades rurales y peri-urbanas; en 2009 desarrollaron el purificador ZEOZ: una llave ultravioleta combinada con un filtro de fibras huecas, más compacto y fácil de transportar e instalar y que reduce la turbidez del agua antes de desinfectarla, viable en zonas rurales y urbanas (Fig. 3.1 b).



Figura 3.1 Tecnologías para la purificación del agua a) Mesita azul diseñada por Cántaro Azul. Obtenida de: <https://www.cantaroazul.org/tecnologias> b) LlavEOZ en una comunidad rural implementada por Grupo EOZ. Obtenida de: <https://ecotec.unam.mx/ecoteca/>

El Centro de Tecnologías Asequibles de Agua y Saneamiento (CAWST, por sus siglas en inglés) publicó un mapa interactivo para identificar proyectos de implementación de tecnologías WASH en diferentes partes del país (Fig. 3.2), entre ellos Friends Who Care Charities, Safe Water International, Household Water Treatment and Safe Storage (HWTS); Global Force Mexico, el Centro De Desarrollo Rural Quetzalcoatl A.C., Global Leadership and Economic Development.



Figura 3.2 Mapa interactivo de tecnologías WASH en México publicado por CAWST: <https://www.hwts.info/projects>

En Michoacán se ha identificado pocas organizaciones y/o instituciones existen enfocadas en el desarrollo e implementación a nivel doméstico de tecnologías para el aprovechamiento y manejo de calidad del agua. Una de las instituciones con mayor trabajo en el tema es el Instituto Mexicano de Tecnología de Agua (IMTA) con la implementación de SCALL y biofiltros dentro del marco del Programa para la Recuperación Ambiental de la Cuenca de Lago de Pátzcuaro. En cada una de las implementaciones se han aplicado y desarrollado conocimientos técnicos sobre innovación, apropiación y adaptación tecnológica, reconocimiento de los conocimientos locales y las dinámicas participativas, estrategias efectivas de comunicación y una alta capacidad de gestión (Moreno et al., 2015). Con base en la búsqueda bibliográfica en México, no se encontraron trabajos o instituciones que desarrollen filtros de bioarena como ecotecnología, de ahí la importancia de trabajos como este, donde se realicen pruebas a un filtro de bioarena diseñado con criterios de innovación que tomen en cuenta el contexto ambiental, socioeconómico y cultural para su implementación, el uso de materiales locales y amigables con el ambiente. Además de lo anterior, es necesario recalcar que es requerida la participación de los usuarios y se deben buscar estrategias participativas de desarrollo tecnológico que vinculen conocimientos científicos con saberes y conocimientos locales.

### ***3.4. Tecnologías Point Of Use (POU)***

Las tecnologías suelen clasificarse en función de la escala o el nivel en que se trata el agua: *sistemas centralizados o comunitarios, de punto de entrada* (PDE), definidas como aquellas que se instalan en o cerca de donde el agua entra en un edificio y se conecta a las tuberías y *de punto de uso* (PDU), aquellas instalados en o cerca de donde se utiliza directamente el agua y pueden estar conectados o no a las tuberías; cada uno de los cuales presenta ventajas y desventajas en cuanto a la eficacia del tratamiento, así como las dimensiones sociales para garantizar un uso, mantenimiento (Hamouda et al., 2012; Mostafa et al., 2021a).

Las tecnologías PDU surgen como una alternativa temporal pero inmediata para el acceso al agua potable segura, son dispositivos o procesos de tratamiento diseñados normalmente para proporcionar un volumen diario adecuado de agua tratada a cada hogar. El objetivo de estas tecnologías es permitir que las personas sin acceso a agua potable mejoren la calidad del agua



tratándola y almacenándola de forma segura en el hogar. Estas tecnologías son capaces de proporcionar un suministro de agua limpia con inversiones de capital significativamente menores y procedimientos de mantenimiento menos complejos (Santos et al., 2016).

Son sistemas de tratamiento de agua *in situ* que reducen los patógenos en las fuentes de agua antes del consumo, mejorando la calidad microbiana del agua que puede utilizarse para beber, cocinar o para la higiene personal en hogares, escuelas, centros sanitarios u otros establecimientos. El tratamiento del agua PDU también se emplea ampliamente por los viajeros, las operaciones militares de campo, para la respuesta a emergencias y desastres, donde y cuando otras opciones para producir y suministrar agua potable no están disponibles o se ven comprometidas (Bailey et al., 2021). Murphy et al., 2010 y Sobsey et al., 2008 mencionan que se estima que la mejora de la calidad del agua de consumo doméstico en el punto de consumo reduce entre un 30% y un 40% las enfermedades diarreicas, lo que hace que este tratamiento sea más eficaz que las mejoras en la fuente.

Aunque hay muchas tecnologías avanzadas de tratamiento de agua disponibles, las tecnologías implementadas en los sistemas de tratamiento PDU de bajo costo se caracterizan principalmente por ser maduras; es decir, han alcanzado un nivel avanzado de desarrollo, estabilidad y aceptación en el mercado, y están diseñadas con el propósito de eliminar los patógenos transmitidos por el agua. Las tecnologías disponibles son principalmente floculación y coagulación, filtración y desinfección. La floculación y la coagulación eliminan la turbidez del agua, lo que reduce la estructura de soporte de los microorganismos y su eliminación. La filtración elimina los microorganismos por exclusión de tamaño, por lo que los microorganismos más grandes que el tamaño de poro del filtro serán retenidos dentro del sistema. La desinfección es la inactivación y destrucción de microorganismos en el sistema a un nivel seguro (Pooi & Ng, 2018).

Se han sugerido, probado y difundido diversas tecnologías PDU, sin embargo, no todas cuentan con una base empírica de eficacia y uso sostenido. Uno de los retos a la hora de tomar decisiones sobre la difusión de estas tecnologías es la falta de pruebas científicas rigurosas sobre el uso sostenido, el impacto en la salud y la mejora de la calidad del agua durante periodos de uso prolongados (Clasen et al., 2015; Sobsey et al., 2008). A pesar de la falta de pruebas rigurosas, de acuerdo con Mahaffy (2014) hay varias situaciones en las que los enfoques PDU se aceptan generalmente como la mejor opción disponible, éstas son:

- Zonas posteriores a catástrofes en las que los sistemas centralizados son inadecuados y/o las familias se han visto obligadas a trasladarse a refugios temporales en los que no se dispone de infraestructuras.
- Casos en los que la recontaminación se produce entre la recogida del agua y su consumo, por ejemplo, cuando no se dispone de agua corriente en el hogar y, por tanto, la contaminación puede producirse fácilmente durante el transporte y el almacenamiento. Es importante señalar que los enfoques POU no mitigarán el riesgo de recontaminación si no se adoptan también prácticas seguras de almacenamiento.
- Casos en los que la calidad o fiabilidad de una fuente de agua (incluso si se suministra a través de una red de tuberías) es cuestionable.

Una de las tecnologías más prometedoras de filtración de agua para uso y consumo humano es el filtro de bioarena (FBA). El filtro de bioarena se diseñó como una modificación del filtro lento de arena, permitiendo la dosificación intermitente de agua para uso doméstico. El FBA es un método eficaz y económico para el tratamiento del agua a nivel domiciliario en comunidades con limitaciones de acceso y saneamiento del agua.

### ***3.5. Mecanismos de filtración***

La filtración se refiere a remoción, principalmente por acción física, de partículas sólidas y agentes contaminantes de un fluido haciéndolo pasar a través de algún tipo de medio poroso o materiales granulares. Este proceso representa una barrera para reducir niveles de turbidez, color y microorganismos nocivos. Además, la filtración juega un papel importante en el enfoque de barreras múltiples empleado para la eliminación de patógenos. La presencia de sólidos en suspensión y cualquier material particulado aumenta la resistencia de la mayoría de los microbios a la desinfección (Cescon & Jiang, 2020).

Las fuentes de agua son cada vez más diversas en sus características, la tecnología de filtración, que durante un tiempo permaneció estandarizada, ahora también se está diversificando y mejorando la eficiencia de los procesos de filtración que se emplean actualmente. Ejemplos de ello son el uso de filtros de alta y baja velocidad, filtros multimédios, granulometrías más grandes y la aplicación de membranas y fibras (Cescon & Jiang, 2020; O'Melia & Stumm, 1967).

Los mecanismos por los que se eliminan las partículas en un filtro son complejos y dependen de las características físicas y químicas de la suspensión y del medio filtrante, de la velocidad de filtración, de las características químicas del agua y de los métodos de funcionamiento del filtro. El flujo de fluido en los poros del filtro es laminar y la eliminación de partículas dentro de los poros de un filtro se realiza mediante mecanismos de transporte que trasladan las partículas pequeñas desde las líneas de corriente en la mayor parte del fluido hasta la superficie de los granos del filtro. Los granos del filtro también se denominan colectores. Cuando las partículas están muy cerca de los colectores, las fuerzas superficiales provocan la captura de la partícula y su fijación al colector. El mecanismo de fijación puede implicar interacciones electrostáticas, fuerzas de London-van der Waals o interacciones químicas superficiales (Amirtharajah, 1988; O'Melia, 1985). Los tipos de mecanismos de transporte y fijación se detallan en el anexo I.

### ***3.6. Filtros de bioarena***

El filtro de bioarena (FBA) es un método de tratamiento de agua que se aplica en el punto de uso. Esta tecnología se utiliza ampliamente para eliminar contaminantes como productos químicos, toxinas, sólidos suspendidos y bacterias del agua que se recoge diariamente de una fuente de agua superficial (Emslie et al., 2022; Lynn et al., 2013). EL FBA consiste en un proceso de filtración que purifica el agua del mismo modo en que lo hace la naturaleza cuando filtra el agua de la lluvia o escorrentías superficiales (Espinosa Bouchot & Vázquez Villanueva, 2011), a medida que el agua percola a través de la arena, la materia orgánica y los microorganismos se eliminan por procesos físicos, químicos y biológicos, logrando la eliminación del 90 y el 99% de bacterias y virus; y una media del 95% de turbidez (Elliott *et al.*, 2008; Primasari *et al.*, 2020; Tiwari *et al.*, 2009). Sin embargo, los FBA se consideran principalmente filtros biológicos en los que un ecosistema microbiano se desarrolla como biocapa en las partículas de arena (Chan et al., 2018; Haig et al., 2011). Ranjan & Prem (2018) mencionan que la biocapa o el *schmutzdecke* (que significa "capa sucia" en alemán) actúa como un medio filtrante que proporciona cierta degradación de los elementos orgánicos solubles en el agua, lo que resulta útil para reducir los sabores, olores y el color.

Desde su creación a principios de los años 90, se han implantado en países como Etiopía, República Dominicana, Kenia y Ghana. La tecnología se considera un éxito porque tiene unos niveles medios de adopción del 94% en los primeros 24 meses después de instalarlos,

sin embargo, la falta de apoyo continuo y la rotura física se señalan como las principales razones por las que los hogares dejan de usarlos (Maciel & Sabogal-Paz, 2020).

### 3.6.1. Modelo y componentes

Los FBA consisten en una cámara de concreto o plástico llena de dos capas de grava en el fondo para asegurar un flujo uniforme a través de la arena y evitar que ésta entre en el tubo de salida; y una capa de arena que funciona como medio filtrante. El tubo de descarga se encuentra elevado permitiendo que el filtro mantenga una capa de agua sobre la superficie de la arena y evita la deshidratación (Fig. 3.6).

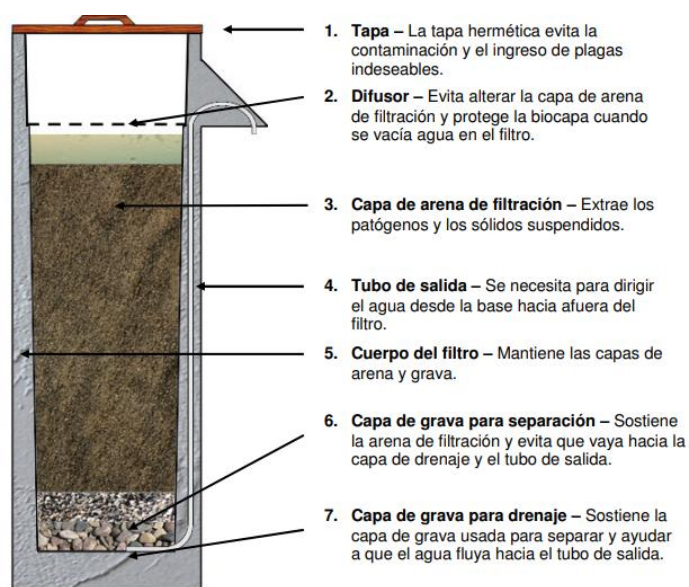


Figura 3.3 Modelo y componentes de un filtro de bioarena (CAWST, 2012).

El FBA es similar a un filtro lento de arena convencional, excepto que su funcionamiento es intermitente, con una o dos cargas de 20 a 10 litros de agua al día, la cual es impulsada por gravedad en lugar de filtración a presión: cuando los usuarios vierten un cubo de agua en el depósito de sobrenadante, se crea una cabeza motriz que empuja el agua a través del filtro, de modo que el caudal disminuye gradualmente hasta que la cabeza alcanza su nivel estático (Mahaffy, 2014). Una parte del agua cargada permanece en el filtro hasta la siguiente carga, el período de tiempo en el que ya no sale agua del filtro se denomina periodo de pausa y debe ser 1 hora o hasta un máximo de 48 horas (CAWST, 2012; Elliott *et al.*, 2008). La capa biológicamente activa de la parte superior del filtro está protegida de la desecación por la

presencia de esta "cabeza estática" de agua. Un tubo de salida elevado garantiza que el nivel de agua en reposo permanezca siempre aproximadamente 5 cm por encima de la superficie de la arena, lo suficiente para mantener la superficie húmeda, pero permitiendo que el oxígeno llegue a la capa biológica durante los periodos de pausa (Buzunis, 1995).

Mientras que un filtro lento de arena (FLA) convencional mide entre 3 y 5 m de alto y entre 4 y 15 m de ancho, el FBA suele medir menos de un metro de alto y menos de 0,5 m de ancho por lo que puede instalarse fácilmente en un hogar. A diferencia de un filtro de arena lento, los FBA tienen instrucciones específicas de construcción, en general los componentes que constituyen el filtro de arena son: 1) Una tapa hermética que evita la contaminación y el ingreso de plagas indeseables, 2) un difusor que permite la entrada homogénea del agua en la capa superficial de arena, evitando la deformación de la capa de filtración, así como el lavado o desintegración de la biocapa a la hora de vaciar el agua al filtro, 3) una capa amortiguadora, una de drenaje y el medio filtrante; y 4) un tubo de salida para recoger el agua filtrada (Espinosa Bouchot & Vázquez Villanueva, 2011; Freitas et al., 2022).

De acuerdo con Napotnik et al. (2021) y Verma et al. (2017) las características del agua de origen, la profundidad del lecho de arena, el volumen de carga, la tasa de filtración, la maduración de la superficie y la biocapa, son factores importantes para diseñar y evaluar el rendimiento de los filtros de bioarena.

### ***3.6.2. Medio filtrante, capa amortiguadora y de drenaje***

La capa de amortiguación se compone por arena fina, con granos de entre 5 a 8 mm, esta capa evita que las partículas de arena entren y obstruyan la entrada de la tubería de descarga situada en la capa de drenaje. La capa de drenaje está constituida por grava gruesa, el tamaño de la grava varía entre 12 y 15 mm, ésta sostiene la grava usada para separar, evita que la grava fina siga moviéndose y bloquee el tubo de salida y, ayuda a que el agua fluya hacia el tubo de salida. (Primasari et al., 2020).

La arena fina actúa como medio filtrante, su tamaño es un parámetro de diseño crítico, con un tamaño efectivo que oscila entre 0.15-0.30 mm y un coeficiente de uniformidad de entre 1.5-3.0 mm (lo que significa que no es demasiado uniforme ni demasiado diverso). (Jenkins et al., 2011) estudiaron los FBA con  $D_{10} = 0.15$  mm y  $D_{10} = 0.52$  mm fuera del rango recomendado y observaron aumentos estadísticamente significativos en la eliminación log<sub>10</sub>

de coliformes fecales (0,16-0,30) utilizando los FBA con  $D_{10} = 0.15$  mm. De acuerdo con varios autores, la profundidad de la arena varía entre 0.45-0.50 m. El manual de construcción de un filtro de arena publicado CAWST recomienda utilizar, para un filtro de 0.94 m, 3 L de grava (aprox. 5 cm), 3.25 L de arena gruesa (aprox. 5 cm) y, 30 L de arena fina (entre 45 a 50 cm) (CAWST, 2012).

Emslie et al. (2022) mencionan que estos valores recomendados tienen una relación directa con el caudal deseado del sistema de filtración de arena, que es de 0.4-1.5 L/min (Freitas et al., 2022; Primasari et al., 2020). Exceder el caudal deseado puede crear cráteres en el medio filtrante y reducir la eficiencia del filtro. La selección y preparación de la grava y de la arena de filtración es muy importante para la eficacia de tratamiento del filtro de bioarena. Una selección y preparación inadecuada de la arena de filtración podría resultar en un rendimiento bajo. Antes de seleccionar la arena, se debe procurar que no contenga materia orgánica (por ej., hojas, pasto, palos, tierra) ni una posible contaminación microbiológica. No debe proceder de una zona que se haya frecuentado por muchas personas o animales. En cuanto a la arena, no debe tratarse de arena muy fina, o arena que está compuesta mayoritariamente de limo y de arcilla.

### ***3.6.3. Tipo de agua a tratar***

Las características del agua reflejan el contenido de microorganismos que componen la biocapa ya que varios microorganismos de la fuente de agua se adhieren a la superficie de la arena y se acumulan para formar parte de la misma (Hwang *et al.*, 2014). Para la filtración, se recomienda una turbidez máxima del agua bruta inferior a 30 NTU, para asegurar que el filtro no se tape; y un nivel de agua estancada de 5 cm por encima de la arena durante el período de pausa (CAWST, 2012; Kubare & Haarhoff, 2010).

Reddy et al. (2022) recomiendan tratar fuentes de agua superficial y subterránea disponibles localmente, como pozos entubados, pozos excavados, estanques, lagos y ríos. Sin embargo, Maciel & Sabogal-Paz (2020) documentaron que el funcionamiento de los filtros con agua pobre en nutrientes provoca un retraso en la maduración del filtro.

En la Tabla 3.1 se presenta un resumen de diferentes estudios que han trabajado con filtros de arena, y el tipo de agua a tratar, estos trabajos han demostrado un buen desempeño de los FBA y la reducción o eliminación de los parámetros evaluados.

Tabla 3.1 Estudios que evaluaron el rendimiento de filtros de arena

Artículo	Región	Tipo de filtro	Tipo de agua a tratar	Parámetros evaluados	Tiempo de evaluación
(Mostafa et al., 2021b)	Chiapas, México	Filtración dinámica de arena.	Manantial	Turbidez	6 meses Visitas semanales.
(Unger & Collins, 2008)	Estados Unidos	Filtro lento de arena.	Río	Conductividad, color, temperatura, pH, turbidez, alcalinidad, oxígeno disuelto, absorbancia ultravioleta a 254 nm (UV254).	Dos años, calidad de agua evaluada diario.
(matuzahroh et al., 2020)	Indonesia	Filtro lento de arena	Río	Coliformes totales	4 meses
(Emslie et al., 2022)		Filtro de bioarena simulado en laboratorio	Agua gris simulada	Biocapa	30 a 50 días
(Duran Romero et al., 2020)		Filtro de bioarena	Pozo y agua de grifo declorada y contaminada con agua residual.	Turbidez, pH, alcalinidad, coliformes totales, E. coli, Nitratos.	3 meses Biocapa en los días 1, 45 y 90
(Primasari et al., 2020)		Filtro de bioarena	Agua residual de un laboratorio.	DQO DBO	14 días
(Stauber et al., 2006)	República dominicana	Filtro de bioarena	Agua recolectada de una planta potable, sembrada con E. coli.	E. coli	43 días
(Lynn et al., 2013)		Filtro de bioarena	Lago con una adición de 1% de agua residual.	Turbidez, TOC, conductividad, E. coli y coliformes totales.	107 días
(Maciel & Sabogal-Paz, 2020)	Brasil	2 filtros intermitentes y 2 continuos, con y sin flotador.	Mezcla de agua de pozo con caolinita y una suspensión de Escherichia coli.	Turbidez, E. coli, color aparente, absorbancia a $\lambda=254$ nm, pH, carbono orgánico total y conductividad eléctrica.	
(Napotnik et al., 2021)		Seis diseños diferentes: tres profundidades de lecho de arena, cada uno con y sin clavos de hierro en la cuenca del difusor.	Agua del grifo declorada aumentada con agua de arroyo y enriquecida con bacterias, protozoos y virus.	Coliformes totales, E. coli, <i>Cryptosporidium parvum</i> y <i>Colifago MS2</i>	

### 3.6.4. Biocapa

La eliminación de partículas en los filtros de arena se ha atribuido normalmente al *schmutzdecke* ("capa sucia" en alemán), pero el *schmutzdecke* se ha definido de diversas maneras: (1) una capa de partículas depositadas en la parte superior del lecho filtrante, (2) el crecimiento biológico en la parte superior del lecho filtrante, o (3) una zona biológicamente activa dentro del lecho filtrante (Weber-Shirk & Dick, 1997). La tercera definición de *schmutzdecke* es la zona biológicamente activa, comúnmente llamado "biocapa", dentro del lecho filtrante. De tal forma que, en la literatura y para fines de este trabajo, *schmutzdecke* y biocapa se utilizan indistintamente.

La biocapa se desarrolla en los 5-10 cm superiores de la superficie de arena y se origina por la adsorción de materia orgánica, especialmente microorganismos (por ejemplo, bacterias, diatomeas, hongos, algas y protozoos), adheridos a una superficie sólida (es decir, la arena) e imbuidos en una matriz de precipitados minerales y sustancias poliméricas extracelulares (EPS). De acuerdo con Demir *et al.* (2018) y Chan *et al.* (2018), la biocapa comienza a formarse a partir de los 15 días de la operación.

La eficacia de eliminación de los FBA se debe en parte a las características de la arena, pero es principalmente el resultado de los microorganismos que colonizan el material filtrante. Partiendo de una arena limpia, el filtro elimina inicialmente la contaminación utilizando únicamente mecanismos físicos como el colado, la sedimentación, interceptación, difusión e hidrodinámica (véase anexo I). Se necesita tiempo para que los factores biológicos y los microorganismos colonicen y crezcan hasta un punto en el que puedan observarse sus efectos. La temperatura es un factor importante, ya que controla la velocidad a la que los microbios pueden crecer y metabolizar el sustrato. Un aumento de 10 °C en la temperatura duplicará aproximadamente la tasa de respiración de la mayoría de los microbios y disminuirá el tiempo de maduración (Buzunis, 1995).

La comunidad microbiana está limitada por la cantidad de materia orgánica disponible/suministrada por el agua bruta entrante; por tanto, el crecimiento va acompañado de una muerte equivalente. Esto libera materia orgánica, que pasa a estar disponible para las bacterias a profundidades inferiores. De este modo, toda la materia orgánica degradable presente en el agua bruta se descompone gradualmente y se convierte en agua, CO<sub>2</sub> y sales



inorgánicas relativamente inofensivas como sulfatos, nitratos y fosfatos. Las bacterias oxidan parte del alimento para obtener la energía que necesitan para su metabolismo, y convierten otra parte en material celular para su crecimiento. Así, las materias orgánicas muertas se convierten en materia viva. La disimilación de los productos es arrastrada por el agua, para ser utilizada de nuevo a mayor profundidad por otra bacteria (Ranjan & Prem, 2018).

La filtración lenta en arena es el único tipo de filtración en arena que se basa en procesos biológicos aeróbicos para obtener una elevada eliminación de contaminantes (Buzunis, 1995). Los mecanismos biológicos de eliminación suelen denominarse mecanismos de depuración, los cuales son:

- Atrapamiento mecánico: Los sólidos suspendidos y los patógenos quedan atrapados entre los granos de arena.
- Adsorción: Los patógenos se adhieren entre ellos, a los sólidos suspendidos que se encuentran en el agua y a los granos de arena.
- Muerte e inactivación: por lo general, los microorganismos requieren entornos bastante específicos para vivir, el entorno de un filtro de arena lento no es adecuado para la vida de muchos patógenos, la temperatura en el filtro suele ser muy inferior a la óptima para estos patógenos, normalmente acostumbradas a una temperatura corporal humana de 37 °C, no prosperan a temperaturas inferiores a 30 °C. Además, debido al elevado número de microbios que colonizan el filtro, el alimento es escaso.
- Depredación: Muchos tipos de organismos depredadores prosperan en la parte superior del lecho filtrante y se alimentan de otras células.
- Excreción de venenos o toxinas: microorganismos producen diversas sustancias que actúan como venenos químicos o biológicos para las bacterias intestinales.

Los tipos de microorganismos y el número relativo de cada especie se adaptan específicamente a las características de la fuente de agua bruta y al entorno del filtro. Normalmente se encuentran diferentes tipos de bacterias a distintas profundidades por debajo de la superficie del filtro (Huisman & Wood, 1974; Ranjan & Prem, 2018). Lazarova & Manem (1995) identificaron las bacterias mediante el aislamiento de la biocapa utilizando la microscopía electrónica de barrido (SEM), dicha investigación encontró la comunidad bacteriana *Pseudomonas stutzeri*.

### 3.6.5. Tasa de filtración

La tasa de filtración, o carga hidráulica, es el parámetro clave de diseño para todos los procesos de filtración y para mantener la actividad biológica. Cuando se trabaja con procesos de tasa constante, la tasa de filtración es simplemente la tasa de flujo dividida por el área de la superficie del medio. El FBA no es un proceso de tasa constante, ya que la tasa de filtración disminuye rápidamente a medida que el nivel de agua en el espacio de cabeza desciende. Dado que el FBA es impulsado por la gravedad, la tasa de flujo es controlada por la capa de medios con la conductividad hidráulica más baja (es decir, la capa superior de arena fina a mediana). Esto hace que las otras dos capas (arena gruesa y grava) sean insignificantes en su impacto en la tasa de flujo (Phillips & Smidt, 2020).

Por lo tanto, una forma de expresar la tasa de filtración es utilizando la tasa de filtración inicial del lecho limpio (es decir, cuando el nivel de agua por encima del medio está al máximo). La tasa de filtración inicial del lecho limpio es la tasa instantánea al comienzo mismo del período de filtración (Kubare & Haarhoff, 2010). Algunos autores recomiendan una tasa de filtración inicial de alrededor de 0.4-1.5 L/min (CAWST, 2012; Elliott *et al.*, 2008; Nakamoto *et al.*, 2014). La modificación del diseño del filtro para que sea más ancho y menos profundo, puede proporcionar caudales más lentos y una mayor eliminación de contaminantes en los filtros de pequeña escala (Phillips & Smidt, 2020).

Lograr el flujo correcto en el filtro de bioarena, es crucial para que funcione bien. Si el flujo es muy rápido, los patógenos serán impulsados rápidamente a través del filtro y la eliminación de patógenos no será tan eficiente. Si el flujo es muy lento, pero podría resultar inconveniente para el usuario, ya que el filtro tardará demasiado en producir agua tratada (CAWST, 2012). Elliott *et al.* (2008) y Stauber *et al.* (2006) evaluaron el caudal día a día, de un filtro y encontraron que será progresivamente más lento a medida que el medio se bloquea gradualmente por la biocapa, un cambio que se observa en una escala de tiempo de días o semanas.

#### 4. Materiales y métodos

En la Figura 4.1 se describe la metodología para analizar el rendimiento del prototipo de FBA propuesto. La metodología consta de cuatro pasos: 1) Diseño y construcción del filtro, 2) Parámetros de diseño, 3) Análisis de calidad de agua y, 4) Análisis de la biocapa.



Figura 4.1 Metodología para evaluar el rendimiento del FBA

#### 4.1. Sitio de estudio

En este proyecto se recolectó agua proveniente de la presa en un registro de mantenimiento ubicado en la ENES Morelia (19.622° N, -101.256° W). La presa constituye una fuente de abastecimiento de agua potable muy importante para 47 colonias de la ciudad, cuenta con una capacidad de almacenamiento de 669.106 m<sup>3</sup> con una superficie máxima de 6 km<sup>2</sup> para una profundidad máxima de 29 m. (Némery et al., 2016). El embalse drena una cuenca volcánica de 627 km<sup>2</sup>, donde se desechan aguas domésticas sin tratamiento alguno ya que depende de la entrada de agua del río Grande de Morelia, el cual se alimenta de aguas residuales de las localidades de Acuitzio, Tiripetío, y Santiago Undameo, así como de escurrimientos que desembocan en ella. Además de alimentar al embalse los escurrimientos arrastran sedimentos y sustancias que alteran la composición fisicoquímica del agua (Arroyo Sesento, 2020; Doan et al., 2015).

El agua que recibe la presa Cointzio contiene altos niveles de nutrientes y sedimentos porque no hay plantas de tratamiento de aguas residuales en los pueblos río arriba y hay un alto contenido de partículas de arcilla muy fina (Némery et al., 2016). Debido al crecimiento demográfico y a las actividades agrícolas y pecuarias, la contaminación del agua se ha incrementado notablemente, lo que dificulta su aprovechamiento (Alatorre Cázares, 2020). Para este trabajo el prototipo de filtro de bioarena representa una iniciativa para la obtención de agua para uso humano mediante la filtración del agua de la presa. Alatorre Cázares (2020) realizó muestreos para caracterizar el agua que llega a la presa de Cointzio, en la Tabla 4.1 se presentan los valores obtenidos por dicho autor respecto a los parámetros fisicoquímicos y bacteriológicos analizados para conocer la calidad de agua del cuerpo de agua.

*Tabla 4.1 Resultados del muestreo en la presa Cointzio; aguas abajo, Santiago Undameo, en temporada de lluvias (Cazares 2020)*

<b>Oxígeno disuelto (mg/L)</b>	<b>4.8</b>	<b>Demanda Química de Oxígeno (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>48</b>
<b>Sólidos totales (mg/L)</b>	1364	<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	13.2
<b>Sólidos Disueltos Totales (mg/L)</b>	92	<b>Coliformes fecales (NMP/100ml)</b>	4.0x10 <sup>7</sup>
<b>Sólidos Suspendidos totales (mg/L)</b>	1272	<b>Nitrógeno Total (mg/L)</b>	5.41
<b>Sólidos Totales Volátiles (mg/L)</b>	136	<b>Fósforo total (mg/L)</b>	1.89

Por razones de practicidad y logística la toma de muestra se realizó en un registro correspondiente a un canal entubado de mantenimiento del OOAPAS donde se canaliza el agua de la presa de Cointzio para su distribución a la ciudad de Morelia. El acceso a dicho registro fue facilitado por el personal de servicios generales y se ubica dentro de las instalaciones de la ENES, unidad Morelia en las coordenadas 19.649° N, -101.223° W (Fig. 4.2).

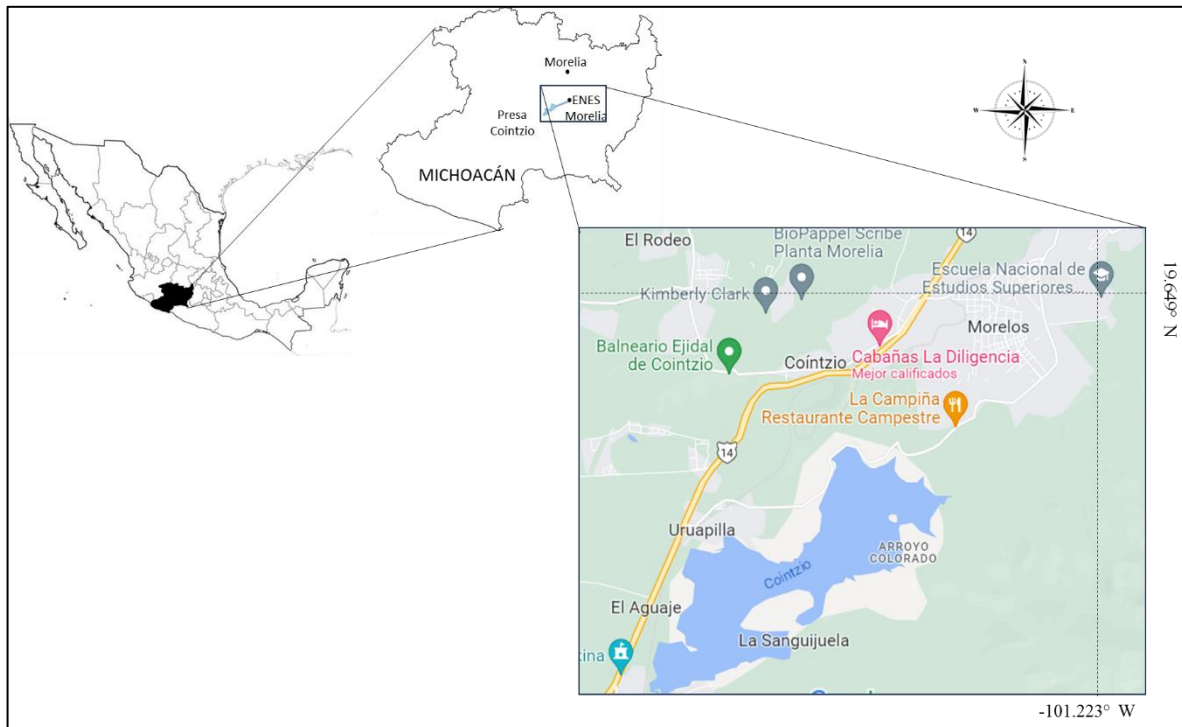


Figura 4.2 Mapa del sitio de estudio

#### **4.2. Diseño del filtro de bioarena**

El diseño se basó en el manual publicado por el Centro de Tecnología Asequible de Agua y Saneamiento (CAWST, por sus siglas en inglés) versión 10.0. Para el diseño alternativo modelado en este estudio, se ha reducido en un 40% la altura, por practicidad y para un fácil mantenimiento; la profundidad del lecho de arena a menos de 40 cm (profundidad común en versiones anteriores del FBA). El volumen del depósito (12 L) y la profundidad de la biocapa (5 cm) se conservaron para que coincidieran con el FBA diseñado por CAWST.

Para diseñar y evaluar el filtro de forma cilíndrica se siguió el procedimiento propuesto por (Kubare & Haarhoff, 2010). Iniciando con la determinación de la tasa de producción de agua

necesaria, la cual fue, una carga de 12 litros al día teniendo un periodo de pausa de 48 h durante tres meses de funcionamiento. La elección de una carga de 12 L se basó tanto en el volumen máximo para el depósito del FBA por encima del material filtrante.

El segundo paso consistió en determinar las propiedades del medio y del agua. Se encontró el valor de la porosidad, en una ficha técnica (Techmo construction products, sf) de 0.60 para la marmolina y se tomó como referencia los valores de la arena sílica para la esfericidad de 0.8, diámetro efectivo de 0.20 mm y un coeficiente de uniformidad de 3.2. La temperatura promedio anual de Morelia es de 21°C, a esta temperatura, aplicando las ecuaciones (1) y (2), la densidad y la viscosidad del agua son de 998 kg/m<sup>3</sup> y 0.0010 kg/ms, respectivamente.

$$\rho = \frac{999.8 + 16.96T - 7.987 \times 10^{-3} \times T^2 - 4.617 \times 10^{-5} \times T^3}{1 + 1.688 \times 10^{-2} \times T}$$

**Ecuación 1**

$$\rho = \frac{999.8 + 16.96(21) - 7.987 \times 10^{-3} \times (21^2) - 4.617 \times 10^{-5} \times (21^3)}{1 + 1.688 \times 10^{-2} \times 21}$$

$$\rho = 998 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.787 \times 10^{-3} - 5.857 \times 10^{-5} \times T + 1.995 \times 10^{-6} \times T^2 - 1.115 \times 10^{-8} \times T^3$$

**Ecuación 2**

$$\mu = 1.787 \times 10^{-3} - 5.857 \times 10^{-5} \times 21 + 1.995 \times 10^{-6} \times 21^2 - 1.115 \times 10^{-8} \times 21^3$$

$$\mu = 0.0010 \text{ kg/ms}$$

El tercer paso fue determinar el volumen adecuado del medio filtrante. Se calculó el volumen de medio necesario con la ecuación 3, para limitar la tasa de filtración inicial del lecho limpio a 1.5 l/min (valor máximo encontrado en la literatura).

$$V_{media} = \left[ \frac{\rho \cdot g \cdot \psi^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot d_{10}^2}{15 \cdot \mu \cdot (1 - \varepsilon)^2} \right] \cdot \frac{V_D}{f(UC) \cdot v_{in}}$$

**Ecuación 3**

Donde:

$\rho$  = densidad del agua ( $\frac{kg}{m^3}$ )

$g$  = aceleración de la gravedad ( $\frac{m}{s^2}$ )

$\psi$  = esfericidad media de la superficie (-)

$\varepsilon$  = porosidad del medio (-)

$\mu$  = viscosidad dinámica del agua ( $\frac{kg}{ms}$ )

$d_{10}$  = diámetro efectivo

$V_D$  = Volumen de dosificación

$f(UC)$  = coeficiente de uniformidad

$v_{in}$  = tasa de filtración inicial ( $\frac{m}{s}$ )

Aplicando las propiedades del medio y del agua establecidas en el paso anterior y un volumen de dosificación de agua de 12 litros en la ecuación (3):

$$V_{media} = \left[ \frac{998 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.8 \frac{m}{s^2} \cdot 0.8^2 \cdot 0.60^2 \cdot 0.0002^2}{15 \cdot 0.0010 \frac{kg}{ms} \cdot (1 - 0.60)^2} \right] \cdot \frac{12 l}{3.27 \cdot 0.0002 \frac{m}{s}}$$

El volumen de medio necesario es de 0.042 m<sup>3</sup>

De acuerdo con Kubare & Haarhoff, 2010, la ecuación 3 garantiza que no se superará la tasa de filtración inicial del lecho limpio. Sin embargo, es necesario garantizar que el agua no atraviese completamente el FBA durante un único ciclo de filtración (asegurando así el contacto con el medio durante el periodo de reposo siguiente). Los poros del lecho del medio filtrante deben ser adecuados para contener al menos todo el volumen de dosificación por lo que sugieren que el volumen del medio debe ser  $1/0.7 = 1.4$  veces más volumen de poros que el volumen de dosificación. Aplicando este factor de seguridad (1.4) y los valores previamente determinados para el volumen de dosificación y la porosidad en la ecuación (4).

$$V_{media} = SF \cdot \frac{V_D}{\varepsilon}$$

**Ecuación 4**

$$V_{media} = 1.4 \cdot \frac{12 l}{0.60}$$

El volumen de medio requerido es de 0.028 m<sup>3</sup>.

El cuarto y último paso consiste en obtener el diámetro del contenedor. Se eligió una profundidad de 30 cm para el medio, teniendo en cuenta que en la etapa anterior se ha determinado que el volumen del medio es de  $0.028 \text{ m}^3$ , la superficie del lecho será de  $0.09 \text{ m}^2$  ( $0.028 \text{ m}^3/0.30 \text{ m}$ ). Para la configuración circular, el lecho tendrá un diámetro de 0.34 m (Fig. 4.3).

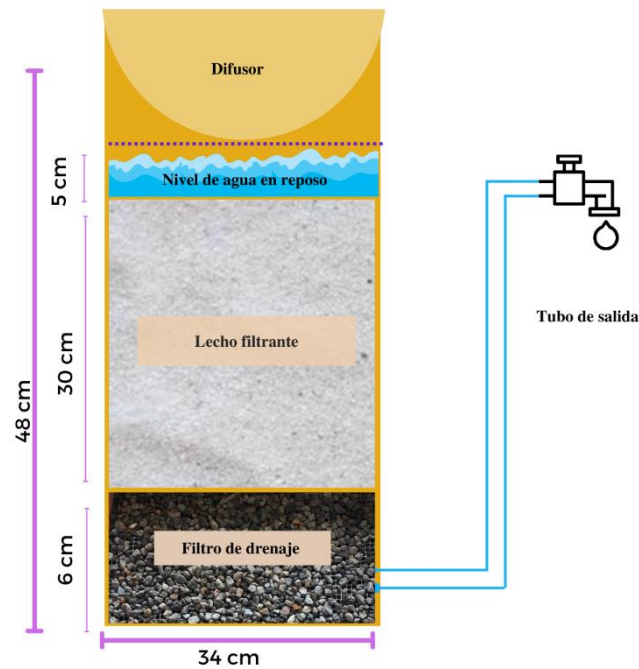


Figura 4.3 Dimensiones y estructura del filtro de bioarena

### 4.3. Elección y preparación de los medios

La capa de drenaje está formada por grava mediana, la cual se puede conseguir en casas de materiales. Para el medio filtrante se seleccionó la marmolina al ser un material de roca triturada, de fácil acceso, logrando conseguirla en casas de materiales o ferreterías. Para calcular cuánto material se necesitaba, se investigó en fichas técnicas la densidad de los materiales, a partir de ello se pudo obtener los kg de grava fina y gruesa y de marmolina para el filtro (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Cantidad de material necesario para el filtro

Filtro	Material	altura (m)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Peso (kg)
Área: <b>0.0804 m<sup>2</sup></b>	Marmolina	0.30	1800	43.4
	Grava	0.06	1600	7.7



- **Cantidad de marmolina**

Volumen (V) = área del filtro \* altura del lecho de arena

**Ecuación 4**

Sustituyendo valores de la tabla 4.2:

$$V = 0.0804 \text{ m}^2 * 0.30$$

$$V = 0.024 \text{ m}^3$$

$$\text{Densidad } (\rho) = \frac{m \text{ (kg)}}{V \text{ (m}^3\text{)}}$$

**Ecuación 5**

Despejando masa de la ecuación 5

$$\text{Masa (kg)} = \text{densidad } (\rho) * \text{volumen (m}^3\text{)}$$

**Ecuación 6**

Tomando en cuenta que *Densidad marmolina* ( $\rho_m$ ) =  $1800 \text{ kg/m}^3$ <sup>1</sup>

Sustituyendo valores de la tabla 4.2 en ecuación 6

$$m = 1800 \text{ kg/m}^3 * 0.024 \text{ m}^3$$

$$m = 43.4 \text{ kg}$$

- **Cantidad de grava**

Sustituyendo valores en ecuación 1

$$V = 0.0804 \text{ m}^2 * 0.06 \text{ m}$$

$$V = 0.0048 \text{ m}^3$$

Tomando en cuenta que *Densidad grava* ( $\rho_g$ ) =  $1600 \text{ kg/m}^3$ <sup>2</sup>

Sustituyendo valores en ecuación 3

$$m = 1600 \text{ kg/m}^3 * 0.0048 \text{ m}^3$$

$$m = 7.7 \text{ kg}$$

\_1Techmo construction products, sf.

\_2(Shah & Pitroda, 2013)

#### 4.4. Tamizado de la arena y grava

Se construyeron 3 tamices para separar los materiales (Fig. 4.4), uno con una apertura de 1 cm, el siguiente de 0.5 cm y por último de 1 mm.

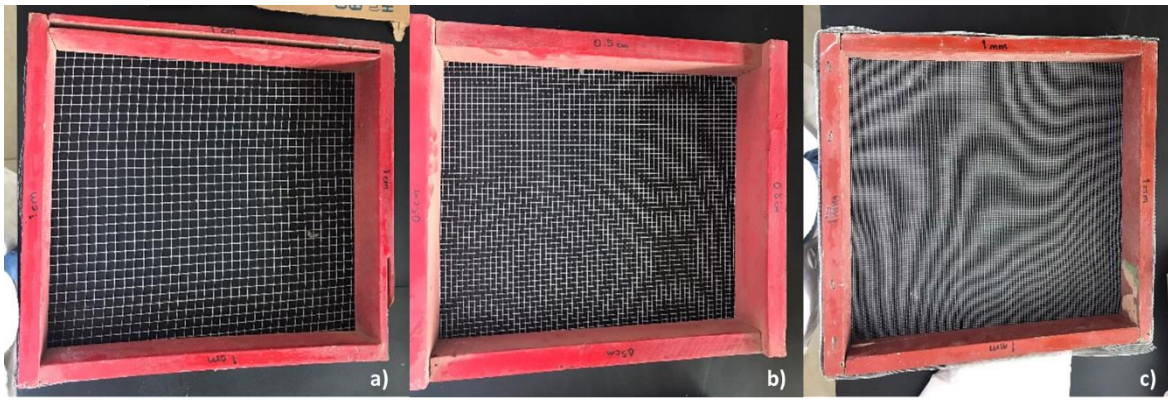


Figura 4.4 Tamices con diferentes aperturas de malla: a) 1 cm; b) 0.5 cm, c) 1 mm

El modelo recibió una capa de drenaje formada por 6 cm de grava gruesa y de grava fina con una proporción de 50/50. Se separó la grava con un tamaño de grano entre 1 cm a 0.5 cm (grava gruesa) y entre 0.5 a 0.1 cm (grava fina). Y una capa de filtración formada por 30 cm marmolina, para la cual se utilizó un tamiz de malla #60, para separar el tamaño de granos entre 0.25 mm (Fig. 4.5). En cuanto a la marmolina, primero se pasó por el tamiz de 1 mm para asegurar que los granos eran menores a esta apertura.



Figura 4.5 Tamizado de la grava y marmolina. a) separación de grava gruesa entre 1.0 a 0.5 cm; b) separación de grava fina entre 0.5 a 0.1 cm; c) separación de marmolina entre 0.25 mm

#### ***4.5. Lavado y esterilización de los materiales***

Para ambos materiales (grava y marmolina) se colocó 6 kg de agregado en una cubeta y se llenó hasta la mitad con agua limpia. El proceso para lavar el material fue: revolver y/o agitar la grava y marmolina en el agua con la mano, para después verter el agua de la cubeta evitando que el material se cayera (Fig. 4.6). Esto se repitió de 6 a 7 veces para la grava y de 4 a 5 veces para la marmolina.



*Figura 4.6 Lavado de materiales. a) grava b) marmolina*

Una vez lavada la grava y la marmolina se pesaron por kilo en bolsas de polipropileno para esterilizarlas en termo-baño a 75°C durante una hora (Fig. 4.7).



*Figura 4.7 Esterilización de los materiales en baño María digital. a) Marmolina b) grava*

#### ***4.6. Caracterización del material por difracción de rayos X***

Se analizó una muestra de la marmolina por medio de difracción de rayos X (DRX) para determinar su composición química. La muestra fue analizada en el Laboratorio de rayos X, de la Unidad de Materiales, UNAM campus Morelia, con un analizador de Bruker XRD modelo D2 Phaser.

Esta técnica es utilizada para estudiar una amplia gama de materiales, como fluidos, metales, minerales y polímeros. Se basa en la interferencia constructiva de rayos X en un intervalo de ángulos y una muestra cristalina. Los rayos X difractados en un intervalo de ángulos se detectan, procesan y cuentan, estos conteos se convierten en picos de difracción, que permite la identificación del compuesto; dado que los cristales se componen de átomos regularmente espaciados, cada compuesto tiene un conjunto de picos únicos a ciertos ángulos definidos, lo que los hace como una huella digital. Para la identificación de los compuestos. Se hace la comparación de estos picos con patrones de referencia ya establecidos (Bunaciu et al., 2015; Whittig & Allardice, 2018).

#### ***4.7. Construcción e instalación del filtro.***

Para el contenedor del filtro se utilizó barro producido por artesanas de la cooperativa Antsetik s'pas Platonos del Valle, que significa “Mujeres que trabajan en platos”, integrada principalmente por mujeres alfareras, en la comunidad de Amatenango del Valle en Chiapas. La señora Paulina Jiménez Gómez, originaria de la comunidad e integrante de la cooperativa fue la encargada de fabricar el contenedor con barro proveniente del Barrio Madronal a 8 o 10 minutos de la comunidad (Figura 4.9). El filtro fue construido por partes, moldeado sin torno, solo con las manos (una de las razones por las que se pudo presentar la grieta en el recipiente). Moldear es solo una parte del trabajo, después, las piezas se dejaron secar al sol, para posteriormente quemarla, es decir, se cuecen con fuego en un horno de leña, libre de humo, para alcanzar temperaturas más altas en la cocción de las piezas lo que proporciona una mayor resistencia. La pieza tarda entre 4 y 5 horas en el horno

Las medidas del FBA diseñado se presentan en la Tabla 4.3, puesto a que el filtro se moldeo a mano las medidas no son regulares, se construyó con un diámetro interno de 32 cm y una altura de 48 cm, por lo que se establece un aproximado del área y volumen total. El difusor se elaboró por aparte, con un diámetro de 33 cm y 15 cm de altura. Una vez teniendo la pieza

de barro, se humedeció para poder abrir 20 agujeros distribuidos sobre la base con un diámetro de 2 mm (Figura 4.8). La tubería de salida se situó a 5.0 cm por encima de la parte superior del medio filtrante, para mantener la profundidad del agua estancada, para ello se utilizó tubos CPVC de ½ pulgada de diámetro.

*Tabla 4.3 Propiedades del diseño y llenado del filtro con materiales*

Diseño	Área total	Volumen total	Volumen de marmolina	Volumen de grava fina y gruesa
	$m^2$	$m^3$	$m^3$	$m^3$
<b>Radio: 16 cm</b> <b>Altura: 48 cm</b>	0.08	0.04	0.024	0.0048



*Figura 4.8 Filtro de barro y su creadora Paulina Jiménez*



*Figura 4.9 Difusor para distribuir la salida del agua sobre la marmolina*

Para la instalación del filtro se colocaron marcas a los 6 cm para la capa de drenaje, posteriormente a los 36 cm para la marmolina y se vertieron 8 litros de agua para prevenir que se formarán bolsas de aire en la marmolina. La grava se separó del medio filtrante por medio de una tela tipo tergalina (fig. 4.10 a) para mejorar el proceso de limpieza cuando el filtro lo necesite. Una vez vertida la grava se vaciaron las bolsas de marmolina previamente esterilizada (fig. 4.9 b). Por último, se aseguró que el volumen de agua sobrante fuera de 5 cm para la formación de la capa biológica (fig. 4.10 c).



Figura 4.10 Instalación del filtro. a) Colocación de la grava con la tergalina. b) Vaciado de la marmolina. c) filtro instalado

#### 4.8. Parámetros de diseño

##### ✚ Caudal

Se midió justo después de cada una de las cargas durante el tiempo de funcionamiento del FBA, midiendo el tiempo (t) que tardaba en llenarse un vaso de precipitado de volumen (V) un litro.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Donde:

Q = caudal ( $\frac{m^3}{s}$ )

V = volumen ( $m^3$ )

t = tiempo (s)

**Ecuación 7**

##### ✚ Tasa de filtración

Se calculó dividiendo la tasa de flujo a través del filtro (Q) por el área superficial del lecho del filtro (A).

$$TF = \frac{Q}{A}$$

Donde:

TF = tasa de filtración ( $\frac{m}{s}$ )

Q = caudal ( $\frac{m^3}{s}$ )

A = área ( $m^2$ )

**Ecuación 8**

#### 4.9. Análisis de calidad de agua

Para la toma se sumergió una cubeta de 19 litros dentro del canal con el cuello hacia abajo hasta una profundidad de 15 a 30 cm y se recolectaron 60 litros en un bidón, los cuales se dosificaron en 12 L para cada carga (Fig. 4.11). Esta colecta se llevó a cabo cada semana entre los meses de abril y agosto. La recolección se realizó con base en los procedimientos de colecta establecidos por la Norma Mexicana NMX-AA-014-1980, la cual establece los lineamientos generales y recomendaciones para el muestreo en cuerpos receptores de aguas superficiales, con el fin de determinar sus características físicas, químicas y bacteriológicas. En cuanto al agua filtrada, se utilizó una cubeta de 19 litros con tapa como recipiente de almacenamiento seguro. Para la toma de muestra se dejó correr el agua aproximadamente 2 o 3 minutos, antes de tomar la muestra.



Figura 4.11 Recolección de la muestra de agua proveniente de la presa en un registro de mantenimiento ubicado en la ENES Morelia. a) Ubicación del registro. b) Toma de muestra. c) Recolección.

Se seleccionaron 14 parámetros a evaluar (Tabla 4.4), con una frecuencia de dos veces a la semana durante el primer mes de funcionamiento (abril-mayo), posteriormente una vez a la semana durante los dos meses restantes (mayo-julio), con excepción de los sólidos suspendidos, disueltos y volátiles lo cuales se evaluaron cada mes, para las muestras filtradas. En cuanto a las muestras del agua de entrada, se realizaron cada que se recolectaba agua del canal, en la Tabla 4.5 se presenta el diseño de los muestreos realizados. Los análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de química de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), unidad Morelia. Así mismo, se realizó una caracterización del agua de la presa para confirmar que el registro de mantenimiento provenía del mismo lugar.

Tabla 4.4 Parámetros y métodos para el análisis de calidad de agua

Parámetro	Unidad	Método	Parámetro	Unidad	Método
Coliformes fecales y <i>E. coli</i>	NMP	Medio de cultivo selectivo con Placas Petrifilm™ 3M™ 6404	Dureza total	(mg/L)	NMX-AA-072-SCFI-2001.
Sólidos totales, disueltos, suspendidos, volátiles totales.	(mg/L)	NMX-AA-004-SCFI-2000	Alcalinidad total	(mg/L)	NMX-AA-036-SCFI-2001
pH	-	Método electroquímico	Temperatura	°C	Método electroquímico
Salinidad	mg/L	Método electroquímico	Demanda Bioquímica de Oxígeno	(mg/L)	Botellas para el sistema de medición de DBO OxiTop.
Conductividad eléctrica	(µS/cm²)	Método electroquímico	Turbidez	(NTU)	Método electroquímico

Tabla 4.5 Diseño de muestreo y análisis de agua entrada /salida

Mes	Análisis		Fecha	Frecuencia
	Entrada*	Salida		
abril	1	1	13/04/2023	2 por semana
		2	19/04/2023	
		3	21/04/2023	
	2	4	26/04/2023	
		5	28/04/2023	
mayo	3	6	04/05/2023	1 por semana
		7	11/05/2023	
	4	8	25/05/2023	
		9	31/05/2023	
junio	6	10	07/06/2023	
		11	16/06/2023	
	7	21/06/2023		
03 al 21 de julio: vacaciones				
julio	8	13	26/07/2026	1 por semana
agosto		14	02/08/2023	

\*Garrafón nuevo



Para comparar los resultados obtenidos se seleccionaron directrices o normas adecuadas entre ellas: los límites permisibles establecidos por las Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, los valores objetivos y límites de la Ley Federal de Derechos y Disposición Aplicable en Materia de Aguas Nacionales 2020, las directrices la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua potable (OMS, 2011) y artículos publicados (De La Mora-Orozco et al., 2017).

### Parámetros microbiológicos

- Prueba presuntiva para las muestras de agua de entrada: siguiendo la Norma Mexicana NMX-AA-042-SCFI-2015 Análisis de agua - Enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y *E. coli*
- Coliformes fecales y *E. coli*: placas 3M™ Petrifilm™, sistema de medio de cultivo para analizar muestras. Para el procedimiento se siguieron las instrucciones del producto, distribuyendo 1 ml de la muestra en el centro de la película inferior (Fig. 4.12) y su incubación por  $48 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$  a  $35 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ . Posteriormente se enumeraron las colonias azuladas a rojo azuladas asociadas con gas atrapado, independientemente del tamaño o la intensidad de color, como *E. coli* confirmada.

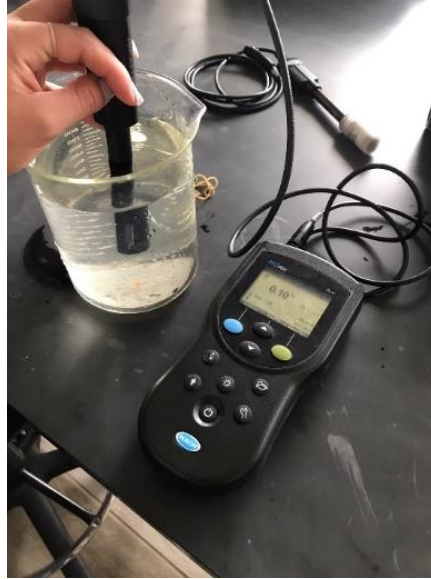


Figura 4.12 Determinación de coliformes por medio de placas Petrifilm

### Parámetros fisicoquímicos

- Análisis de temperatura, pH, salinidad y conductividad eléctrica: Multiparamétrico HACH HQ 30d, con electrodo pH101 para temperatura y pH, además del electrodo

CDC401 para salinidad y conductividad eléctrica. Para el análisis, se retiró la tapa inferior de la sonda y, a continuación, se sumergió el electrodo completamente en la muestra, evitando que la sonda no tocara los bordes del contenedor (Fig. 4.13).



*Figura 4.13 Determinación con multiparamétrico HACH HQ 30d*

- Turbidez: turbidímetro portátil marca WTW modelo pHotoFlex® Turb, a partir del detector óptico se detecta la cantidad de luz dispersada por las partículas del agua en un ángulo de 90 grados con respecto a la fuente de luz. Se llenó un frasco limpio y seco con 10 ml de muestra (Fig. 4.14).



*Figura 4.14 Evaluación de turbidez mediante turbidímetro portátil marca WTW modelo pHotoFlex® Turb*

- Dureza total: siguiendo la Norma Mexicana NMX-AA-072-SCFI-2001, la cual consiste en una titulación y valoración empleando una solución llamada EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) que se agrega al agua que se va a analizar y el negro de eriocromo T como indicador, de color rojo que en la presencia de calcio y magnesio vira a azul (Fig. 4.15). Para calcular la dureza total se utilizó la siguiente ecuación:

$$\text{Dureza total expresada como } CaCO_3(\text{mg/L}) = \frac{(A - B) \times C \times 1000}{D}$$

Donde:

A = ml de EDTA gastados en la titulación de la muestra;

B = ml de EDTA gastados en la titulación en el blanco (si fue utilizado);

C = mg de  $CaCO_3$  equivalentes a 1 ml de EDTA, y

D= ml de muestra



Figura 4.15 Determinación de dureza total. a) montaje del equipo de titulación; b) vire del color rosa a azul producido por el indicador Eriocromo negro T.

- Alcalinidad total: siguiendo la Norma Mexicana NMX-AA-036-SCFI-2001. La medición de la acidez o alcalinidad en el agua es por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e indicador el anaranjado de metilo que vira de amarillo a anaranjado canela (Fig. 4.16). Se realizó el cálculo de la alcalinidad total como  $CaCO_3$  en mg /L, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Alcalinidad total como } CaCO_3 \text{ en mg/L} = \frac{AXN}{100} (50)(1000)$$

Donde:

A = volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del anaranjado de metilo en ml;

N = normalidad de la disolución de ácido;

100 = volumen de la muestra en ml;

50 = factor para convertir eq/L a mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ; y

1000 = factor para convertir ml a L.



Figura 4.16 Determinación de alcalinidad. a) montaje del equipo de titulación; b) vire del color amarillo a naranja canela producido por el indicador anaranjado de metilo.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>): Equipo OxiTop marca WTW modelo OxiTop®-i IS 6 e incubadora para determinar DBO a cinco días (Fig. 17). Lectura de presión en un sistema cerrado que utiliza cabezales de medición conectados a los frascos de muestras. Los microorganismos contenidos en la muestra consumen el oxígeno generando  $\text{CO}_2$ , el cual se absorbe con el NaOH produciendo una presión negativa que se puede determinar cómo mg/L DBO.



Figura 4.17 Botellas OxiTop para prueba de DBO5

- Sólidos totales (ST), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos volátiles totales (SVT): siguiendo la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015. Una medición cuantitativa, mediante la filtración, evaporación y calcinación del agua de entrada y salida, a temperaturas de 99°C para la evaporación de la muestra y a 700 °C durante 2 horas para la calcinación. (Fig. 18) En cada etapa los residuos son pesados y sirven de base para el cálculo del contenido de estos.



Figura 4.18 Determinación de sólidos totales. a) Montaje de equipo de filtración Millipore. b) membranas Millipore con sólidos suspendidos. c) crisol en la mufla.

#### 4.10. Tasas de eliminación

Se utilizó la media aritmética y la desviación estándar para todos los datos, excepto los coliformes totales, para los que se utilizó la media geométrica. Para calcular la tasa de eliminación (TE) en el filtro de los distintos parámetros se ha usado la Ecuación 6 y la Ecuación 7 para calcular los porcentajes de reducción de bacterias.

$$TE = \frac{C_{influyente} - C_{efluente}}{C_{influyente}} \times 100$$

Donde:

TE = tasa de eliminación (%),

$C_{influyente}$  = concentración de entrada de cada parámetro

$C_{efluente}$  = concentración de salida de cada parámetro.

**Ecuación 9**

$$\log_{10} \text{removal} = -\log_{10} \left[ \frac{C_{efluente}}{C_{influyente}} \right]$$

**Ecuación 10**

#### 4.11. Estudio de la formación de la biocapa

Se observó el desarrollo de la biocapa en muestras de los granos de marmolina de la parte superior del medio filtrante (1-3 cm de profundidad) mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Se tomaron muestras mensuales, así como una muestra al principio de la construcción del filtro (tiempo 0). Para colectar la muestra de la biocapa, se introdujo una espátula en la marmolina hasta una profundidad de entre 1 y 3 cm para extraer aproximadamente 1 g de muestra y asegurarse de que las partículas de marmolina permanezcan organizadas como en el filtro, con lo cual se garantiza una mínima alteración de la biocapa (Figura 4.19 a). La primera muestra (tiempo 0) se conservó en alcohol al 70% (Figura 4.19 b) y se observó en bajo vacío con un Microscopio Electrónico de Barrido (JSM-IT300) en el laboratorio de Microscopía en la ENES, unidad Morelia.



Figura 4.19 Toma de muestra de la biocapa. a) Toma de muestra de marmolina con una espátula. b) Vial con la muestra en alcohol 70%.

Para las muestras tomadas al término del proyecto, se fijaron en glutaraldehído durante 48 hrs, posteriormente se deshidrataron secuencialmente en alcohol del 10% al 96%. Una vez deshidratadas, las muestras se pasaron a un secador de punto crítico, montándose en soporte de aluminio con cintas de carbono de doble cara y recubiertas con oro (Figura 4.20).

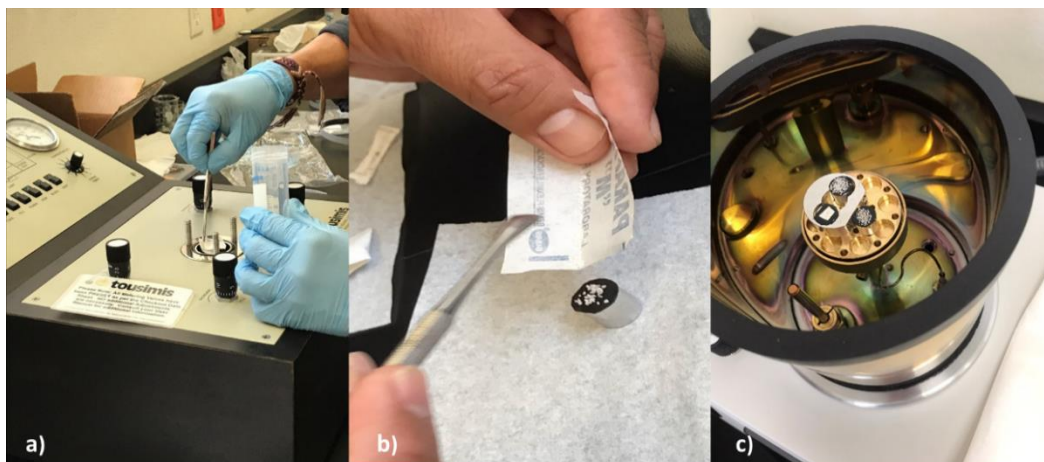


Figura 4.20 Preparación de la muestra de la biocapa para su observación en SEM. a) Secador de punto crítico. b) Montaje de las muestras en cinta de carbono de doble cara. c) recubrimiento con oro.

## 5. Resultados y discusión

### 5.1. Caracterización del material por difracción de rayos X

El análisis realizado a la marmolina utilizada reportó que los patrones de picos coinciden con el compuesto de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y carbonato de magnesio, comúnmente llamado dolomita o marmolina  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , como se puede observar en la figura 5.1. Sin haber ningún otro compuesto en el material.

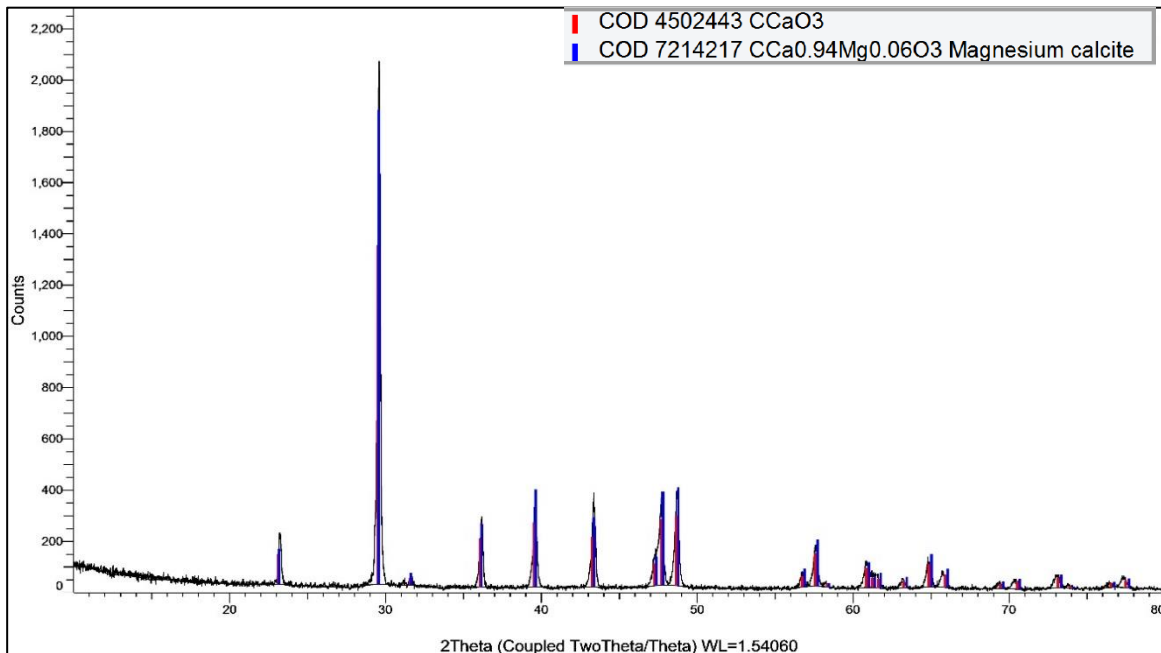


Figura 5.1 Difractograma de rayos X de la marmolina

### 5.2. Parámetros de diseño

- Caudal

El caudal es un parámetro operativo clave que influye en la eficacia del filtro. En general, para los FBA, los caudales más bajos producen una mayor eliminación, y a medida que la biocapa se hace más densa, el caudal del filtro disminuye. El caudal inicial del filtro evaluado fue de 0.69 l/min, estando dentro del rango recomendado por CAWST de 0.4 a 1.5 L/min. Al final del proyecto disminuyó a 0.47 L/min. En la figura 5.2, observamos fluctuaciones en los primeros días de muestreo debido a la estabilización del filtro entre el primer y segundo mes de funcionamiento (muestra 1 a 11). A partir del tercer mes y para el final del proyecto, se observa una disminución en el caudal, como reportan Elliott



*et al.* (2008) y *Stauber et al.* (2006), este resultado nos indica un bloqueo gradual, posiblemente por la formación de la biocapa y por partículas provenientes del agua del cuerpo natural. La franja morada entre la muestra 7 y 9, indica el momento de la fuga.

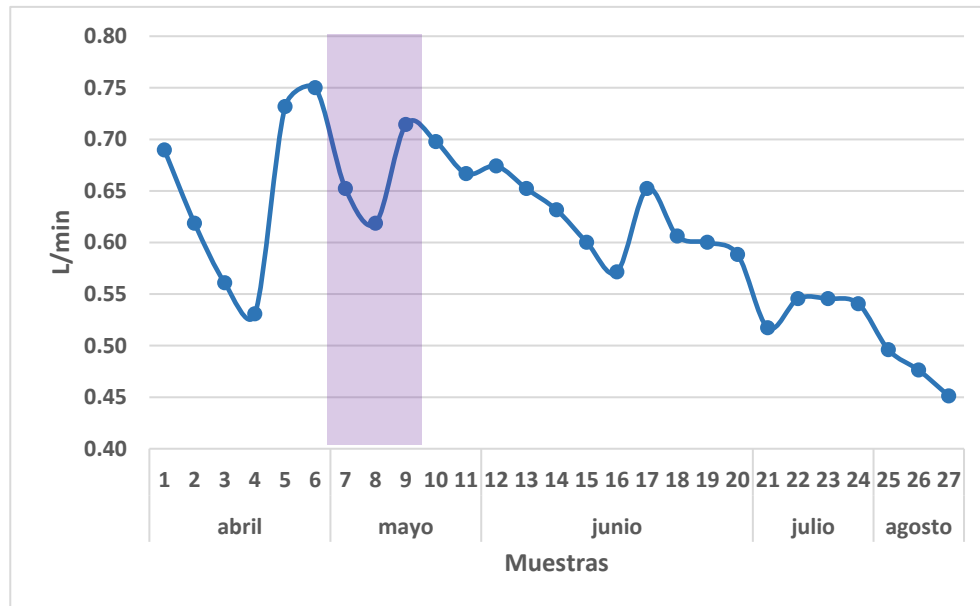


Figura 5.2 Comportamiento del caudal

- Tasa de filtración

La tasa de filtración presentó un comportamiento similar al caudal, observamos fluctuaciones en los primeros días de muestreo debido a la estabilización del filtro y a partir del tercer mes y para el final del proyecto, se observa una disminución (Fig. 5.3).

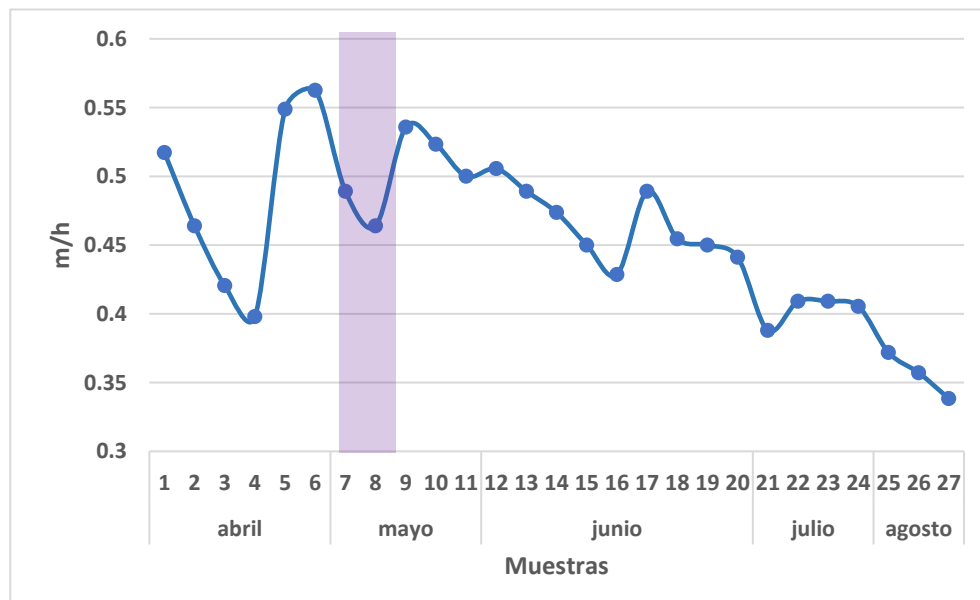


Figura 5.3 Comportamiento de la tasa de filtración

Se obtuvo un promedio de 0.45 m/h dentro del rango mencionado por Freitas et al. (2022). A diferencia del caudal, la tasa de filtración involucra el tamaño del filtro y puede variar según el tipo de filtro de agua que se esté utilizando.

### 5.3. Análisis de calidad de agua

Se realizó una comparación del agua de la presa y del registro del mantenimiento para su caracterización, los resultados se encuentran detallados en la Tabla 5.1. Los parámetros analizados muestran similitudes con los valores obtenidos en el registro de mantenimiento. No obstante, es esencial tener en cuenta que, durante el trayecto desde la presa hasta el punto de registro, existe la posibilidad de que el agua se mezcle con otros escurrimientos o descargas, lo que podría alterar sus características. Sin embargo, la diferencia observada no parece ser significativa, lo que sugiere que el agua registrada en el Registro de la ENES proviene probablemente de un cuerpo natural y cumple con las características para probar el filtro.

*Tabla 5.1 Caracterización el agua de la presa Cointzio, comparada con el agua del registro de mantenimiento de la ENES*

<b>Parámetro</b>	<b>Presa</b>	<b>Registro de mantenimiento</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Presa</b>	<b>Registro de mantenimiento</b>
<b>pH</b>	8.55	6.70	<b>Oxígeno disuelto (mg/L)</b>	1	1
<b>Salinidad (‰)</b>	0.09	0.09	<b>Turbidez (NTU)</b>	3.81	2.25
<b>Conductividad (µs/cm)</b>	183.6	197.5	<b>Dureza (mg/L)</b>	62.7	65.3
<b>Temperatura (°C)</b>	17.9	27.16	<b>Alcalinidad (mg/L)</b>	97.2	95.3

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de 10 parámetros de calidad del agua del registro de mantenimiento, los cuales fueron monitoreados a lo largo de cuatro meses. Se analizaron 14 muestras de agua filtrada y 8 de agua de entrada. En la Tabla 5.2, se detallan las fechas en las que se realizaron los análisis de las muestras, así como los resultados para cada parámetro y su respectivo promedio. Los valores de los sólidos suspendidos, disueltos y volátiles fueron evaluados al inicio y al final del proyecto, y sus resultados se presentan en la Tabla 5.3.

Tabla 5.2 Resultados de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos obtenidos de las pruebas en el FBA

Muestra	Fecha de análisis		Parámetros fisicoquímicos																Parámetros microbiológicos			
			Temperatura (°C)		pH		Salinidad (‰)		Conductividad eléctrica (µS/cm)		Turbidez (NTU)		Dureza total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )		Alcalinidad total (mg/L de CaCO <sub>3</sub> )		DBO5 (mg/L)		Coliformes totales (UFC/100mL)		E. coli (UFC/100 mL)	
			E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S
1	11/04/2023	13/04/2023	23.1	22.6	7.52	8.07	0.1	0.2	208.1	422	1.97	0.41	67	98.6	100.5	124.6	2	1	900	87500	0	100
2	17/04/2023	19/04/2023		21.4		7.48		0.11		227		0.34		76		111.8		1	98800	87500	0	100
3	19/04/2023	21/04/2023		21.8		7.27		0.1		248.6		0.46		76		110		1	119500	15000	0	100
4	24/04/2023	26/04/2023	22.6	21.7	6.83	7.52	0.09	0.11	189.8	224	1.87	0.41	61.2	81.3	95.3	113.65	3	3	155500	15000	0	100
5	26/04/2023	28/04/2023		21.8		7.61		0.1		221		0.43		78.6		110		2	82500	15000	0	100
6	02/05/2023	04/05/2023	20.5	23.3	6.92	7.27	0.09	0.11	189.7	224	3.04	0.27	65.3	82.6	95.3	111.8	4	3	98500	110000	0	2000
7	09/05/2023	11/05/2023		21.8		7.6		0.1		214.4		0.22		73.3		115.5		2	48100	110000	0	2000
8	23/05/2023	25/05/2023	21.4	25.1	6.8	7.31	0.09	0.12	190.6	259	2.28	0.87	66.6	90.6	97.15	124.65	2	4	24500	31900	0	800
9	29/05/2023	31/05/2023	21.4	24.8	7.02	7.39	0.09	0.12	193.7	247	3.37	0.28	62.6	86.6	102.65	128.3	4	2	326500	141500	0	500
10	05/06/2023	07/06/2023		26.9		7.54		0.11		241		0.38		84		122.85		5	282000	141500	0	500
11	14/06/2023	16/06/2023	27.1	28.5	6.7	7.37	0.09	0.11	197.5	241	2.25	0.15	65.3	81.3	100.85	122.85	6	5	4700	26800	200	1000
12	19/06/2023	21/06/2023	26.2	26.2	7.07	7.65	0.1	0.12	203.1	248	3.86	0.2	64	85.3	108.15	132	7	5	11500	47900	0	1500
13	24/07/2023	26/07/2026	20.5	22.1	6.98	7.73	0.1	0.12	204	252	6.44	0.42	76	90.7	106.3	132	3	2	36500	81000	100	300
14	31/07/2023	02/08/2023		24.8		7.82		0.11		232		0.43		81.3		121		3	17200	81000	100	300
Promedio			22.9	23.8	7.0	7.5	0.1	0.1	197.1	250.1	3.1	0.4	66.0	83.3	100.8	120.1	3.9	2.8	41783.4	53754.6	28.6	671.4

E= entrada, S= salida

- Temperatura

Se registró una temperatura promedio de 22.93 °C para el agua de entrada y un valor de 23.77 °C para el agua filtrada. En la Fig. 5.4 se puede observar que el cambio de temperatura no es demasiado significativo entre la entrada y la salida, ambas se aproximan a la temperatura ambiente promedio (20 a 25°C). Esto es consistente con los resultados de Primasari et al. (2020) donde no hay grandes cambios de temperatura entre las muestras antes y después del tratamiento con filtros de bioarena.

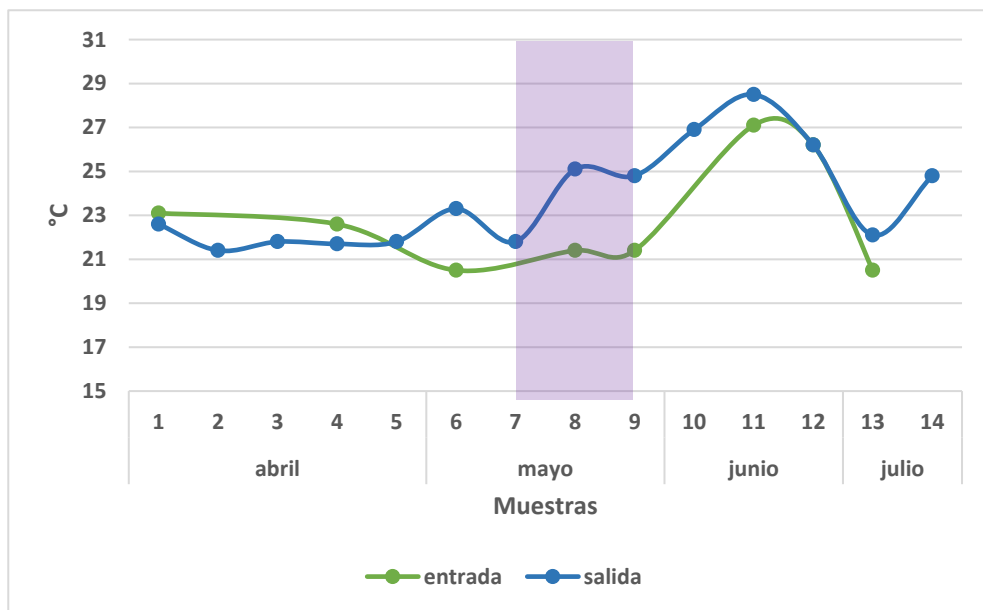


Figura 5.4 Comportamiento de la temperatura en las pruebas del FBA

- pH

Se registró un valor promedio de 6.99 para el agua de entrada y de 7.55 para el agua filtrada. El pH del agua aumenta menos de una unidad después de pasar por el filtro, como se puede observar en la Fig. 5.5. De acuerdo con Cescon & Jiang (2020), para el agua filtrada estos valores pueden deberse a la arena sílica. En el caso de ese filtro, la marmolina utilizada como medio filtrante, se compone principalmente de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), el cual, en presencia de agua, libera iones de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y iones de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ), que acorde con el sistema de carbonatos estos iones reaccionan con los iones  $\text{OH}^-$ , lo que reduce la concentración de iones  $\text{H}^+$  y aumenta el pH (Fontela et al., 2023). Por otro lado, tanto el agua de entrada como la de salida se encuentran dentro del rango permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Mantener un pH adecuado es esencial para garantizar que

el agua sea segura, este libre de contaminantes, tenga buen sabor y olor, y no cause daño a las infraestructuras de distribución.

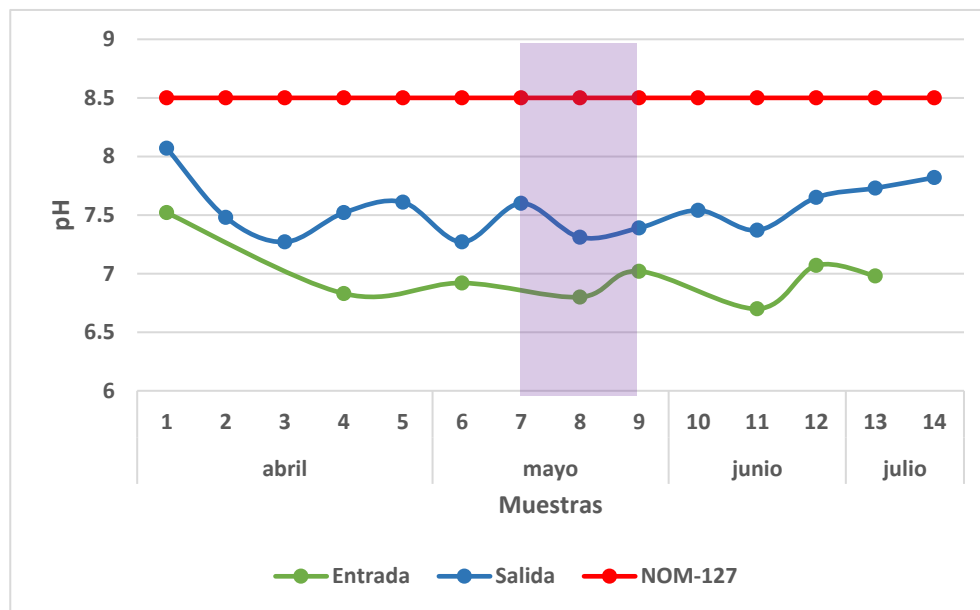


Figura 5.5 Comportamiento del pH en las pruebas del FBA.

- Salinidad

Se presentó un valor promedio de 0.09 ‰ para el agua de entrada y 0.12 ‰ para el agua de salida. Los valores del agua de entrada se mantienen constantes entre 0.09 y 0.10 ‰ de salinidad. En el primer día de filtración se registró un valor de 0.2 ‰ de salinidad dado el enjuague del filtro y su estabilización en las primeras cargas. La salinidad aumenta dos unidades a la salida del filtro, como se observa en la Fig. 5.6 el agua de salida presenta valores más altos de salinidad respecto a la de entrada, lo que se atribuye a la dolomita ( $\text{CaMgCO}_3$ )<sub>2</sub> y el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), presente en la marmolina, ya que la concentración de los iones de magnesio y calcio que al entrar en contacto con el agua se disuelven y pueden aumentar la salinidad en el agua.

Para este parámetro no se encontró alguna directriz o norma que establezca un límite permisible, sin embargo, es importante monitorear los niveles de salinidad ya que obtener altos valores pueden afectar negativamente la percepción del sabor del agua y, por lo tanto, la disposición de las personas a utilizarla.

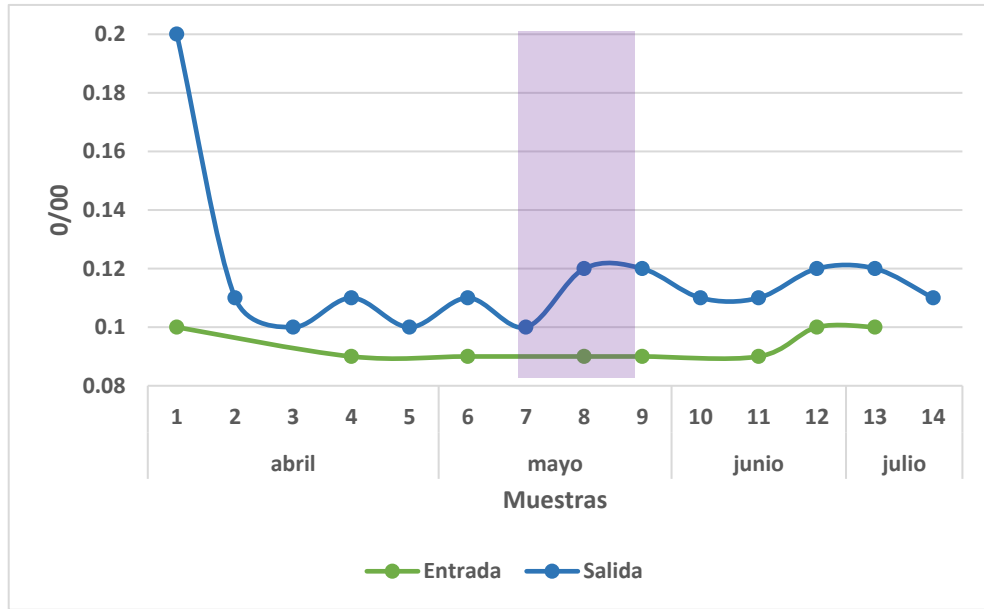


Figura 5.6 Comportamiento de la salinidad en las pruebas del FBA

- Conductividad eléctrica

Para la conductividad eléctrica se obtuvo un valor promedio de 197  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para el agua de salida y 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$  después de pasar por el filtro. Los valores del agua de entrada se mantienen entre 190 a 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La Fig. 5.7 se puede observar que el valor más alto para el agua de salida se registró el primer día con un valor de 422  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , esto debido a la limpieza del material utilizado y la estabilización de las primeras cargas. La conductividad eléctrica es más alta después de pasar por el filtro, coincidiendo con la salinidad; debido a la dolomita ( $\text{CaMgCO}_3$ )<sub>2</sub> y el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), presente en la marmolina.

El agua de entrada cumple con el límite permisible establecido por la OMS de 250  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ; en cuanto el agua de salida, el promedio coincide con el límite y solo la muestra 8 registró un aumento por encima del límite con un valor de 259  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Conservar la conductividad eléctrica por debajo del límite es de suma importancia debido a que registrar valores anormalmente altos pueden señalar la presencia de contaminantes químicos, como sales inorgánicas, que pueden ser perjudiciales para la salud humana si se encuentran en concentraciones elevadas. La conductividad eléctrica también suele utilizarse para evaluar la eficacia de los procesos de tratamiento de agua, el agua filtrada

no muestra cambios en la conductividad a lo largo del tratamiento lo que nos puede indicar que el proceso de eliminación de contaminantes es efectivo.

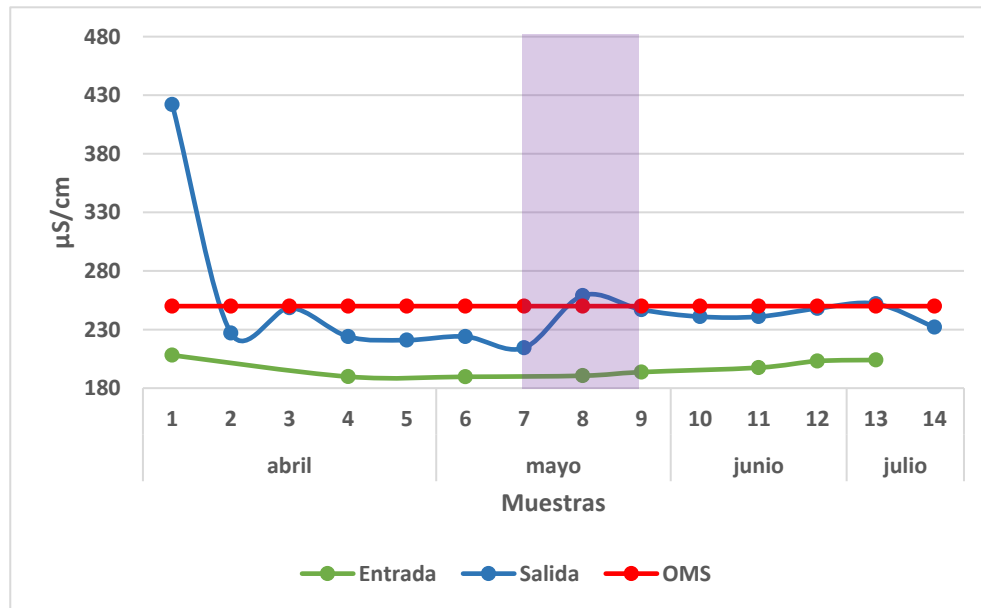


Figura 5.7 Comportamiento de la conductividad eléctrica en las pruebas del FBA

- Turbidez

En cuanto a la turbidez se registró un promedio de 3.14 NTU para el agua de entrada y 0.38 NTU para la de salida. El agua de entrada se mantiene entre 2 a 3 NTU en abril y mayo, sin embargo, para los meses junio y julio presenta un incremento llegando a registrar un valor de 6.5 NTU, posiblemente debido al periodo de lluvias que ocasiona el aumento de agitación y partículas suspendidas en el agua. En la Fig. 5.8 se observa que las mediciones obtenidas no presentan mucha fluctuación para el agua de salida, obteniendo valores cercanos a 0 NTU, el valor más alto de salida se presentó en la muestra 8 (0.87 NTU).

Se calculó un porcentaje de remoción del 88%, un valor por debajo del 95% (Elliott *et al.*, 2008; Primasari *et al.*, 2020; Tiwari *et al.*, 2009). Sin embargo, si cumple con el límite permisible de 4 NTU, establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. Estos resultados obtenidos son de importancia para la calidad estética del agua, dado a que influye en la aceptabilidad de los consumidores. Por otro lado, lograr un valor menor a una NTU garantiza la eficacia de algún proceso de desinfección posterior a la filtración

ya que se ha demostrado han demostrado que, en el proceso de desinfección por cloro, las partículas causantes de la turbiedad reducen la eficiencia del proceso y protegen físicamente a los microorganismos del contacto directo con el desinfectante (De Vargas, L., 2004).

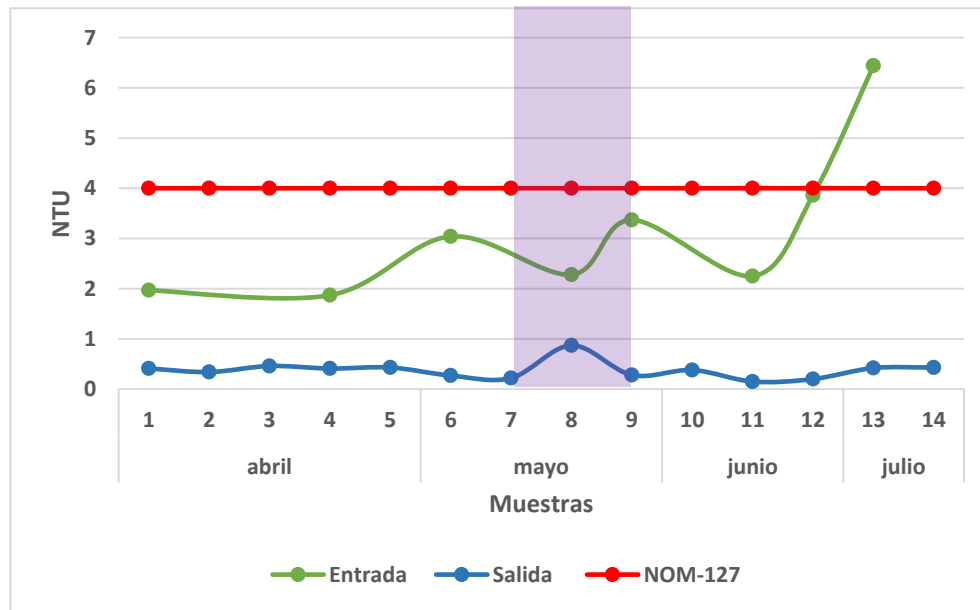


Figura 5.8 Comportamiento de la turbidez en las pruebas del FBA

- Dureza total

Se registró un valor promedio de 66.0 mg/L para el agua de entrada, en la Fig. 5.9 se puede observar que los valores se mantienen entre los 61 y 66 mg/L, mostrando un incremento en la última muestra con un valor de 76 mg/L. En cuanto al agua de salida se obtuvo un promedio de 83.3 mg/L, con un valor más alto en la primera muestra (98.6 mg/L) lo que se puede explicar con el enjuague de la marmolina y la grava. La dureza en la salida es más alta, mostrando un incremento del 26% respecto a la entrada, posiblemente esto se deba a la concentración de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) presentes en la marmolina en forma de carbonatos de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y dolomita ( $\text{CaMgCO}_3$ ). Por otro lado, tanto el agua de entrada como la de salida se encuentran por debajo del límite permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, de 500 mg/L.

En términos generales, puede considerarse que el agua filtrada es blanda ya que no supera los 100 mg/L ; lo que nos indica un resultado positivo al ser menos propensa a la formación



de incrustaciones en las tuberías, sin embargo, puede ser más corrosiva hacia ciertos metales por lo que ciertos metales pesados como cobre, zinc, plomo y cadmio pueden estar presentes en el agua potable (Pérez-López, 2016); aunque no se ha definido si la dureza tiene efectos adversos sobre la salud, es importante realizar análisis más completos para asegurar la ausencia de metales pesados que puedan incidir en la salud humana.

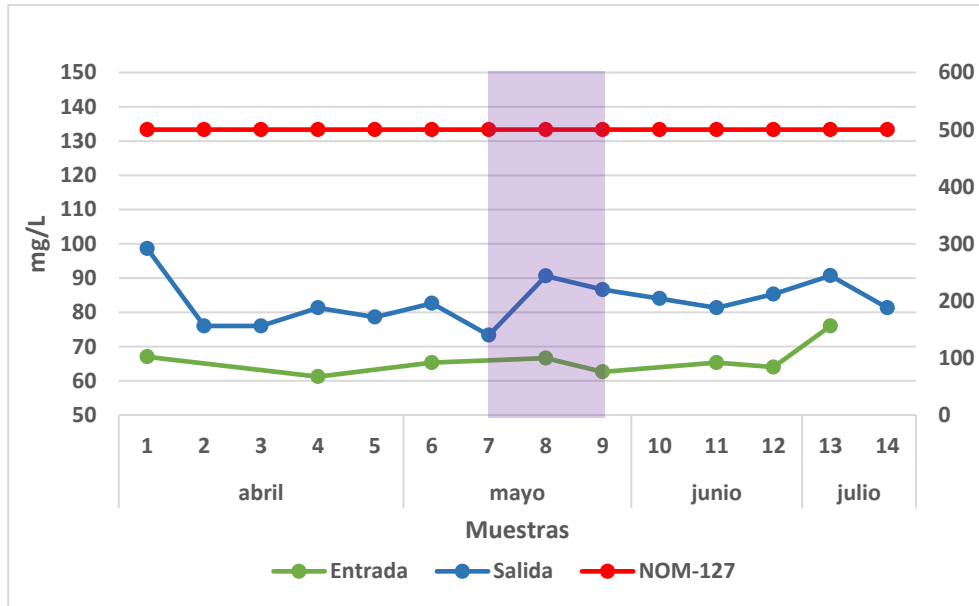


Figura 5.9 Comportamiento de la dureza total en las pruebas del FBA

- Alcalinidad total

Respecto a la alcalinidad, el agua de salida se mantiene entre 95 a 108 mg/L, registrando un promedio de 100.78 mg/L. En la Fig. 5.10 se puede observar el comportamiento tanto del agua de entrada como la de salida, entre los meses de junio y julio la alcalinidad del agua de entrada presenta un incremento, lo que puede ser causa del periodo de lluvias que ocasiona el transporte de minerales, materia orgánica y nutrientes desde la superficie hasta los cuerpos de agua. La alcalinidad del agua filtrada se mantiene entre los 132 a 110 mg/L, con un promedio de 120.07 mg/L. En congruencia con los valores obtenidos del pH y dureza, la alcalinidad del agua filtrada es más alta que el agua de entrada, lo que también se puede explicar con los compuestos presentes en la marmolina, los cuales al diluirse en el agua pueden incrementar la dureza y el pH, dando como resultado un agua más alcalina.

Para este parámetro no se encontró alguna directriz o norma que establezca un límite permisible, sin embargo, Pérez-López (2016) reporta que el rango de la alcalinidad para agua potable, oscila en valores de 50 a 200 mg/L; de acuerdo con lo anterior se obtuvieron resultados dentro del rango permisible para agua potable en las muestras de agua de entrada y salida, lo que resulta positivo puesto a que cuando la alcalinidad alcanza niveles altos puede incidir sobre el sabor y el carácter corrosivo o incrustante que pueda tener el agua (De Vargas, L., 2004).

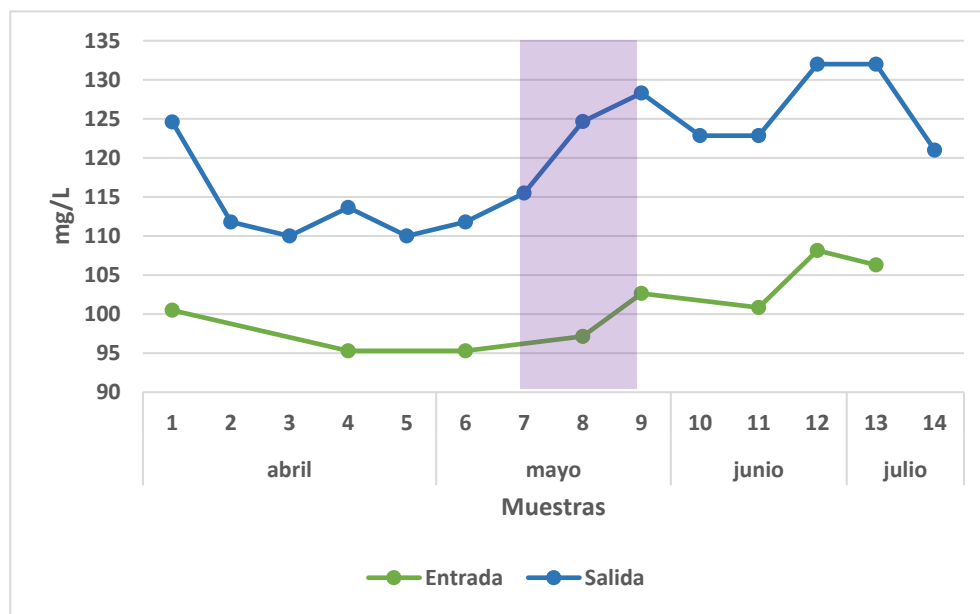


Figura 5.10 Comportamiento de la alcalinidad total en las pruebas del FBA.

- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>)

Se registró un valor de DBO<sub>5</sub> entre 2 y 4 mg/L para el agua de salida, con un promedio de 3.88 mg/L. En la Fig. 5.11 se observa un incremento entre los meses de junio y julio de hasta 7 mg/L, lo que se le puede atribuir al periodo de lluvias, que como se explicó en el parámetro de la turbidez y alcalinidad, promueve el transporte de materia orgánica y partículas suspendidas que aumentan la demanda de oxígeno para su degradación. Por otro lado, el agua filtrada presenta valores entre 1 y 3 mg/L, con un promedio de 2.79 mg/L. El agua filtrada también presenta un incremento de hasta 5mg/L en los meses de junio y julio, lo que puede indicar la degradación de la materia orgánica, sin embargo, los valores se mantienen por debajo de los 7 mg/L reportados para el agua de entrada. En la muestra 8, se observa que el

valor de DBO<sub>5</sub> del agua de salida se encuentra por arriba del reportado para el agua de entrada, probablemente a causa de una fuga que se presentó en el filtro, lo que posiblemente ocasionó el aumento de microorganismos en el medio filtrante y representó un incremento en el valor de DBO<sub>5</sub>.

En promedio, el agua de entrada no cumple con el límite permisible establecido por la OMS de 3 mg/L, por otro lado, después de pasar por el filtro se registra una reducción del 28% de la DBO<sub>5</sub>, estando por debajo del límite, con 2.7 mg/L.

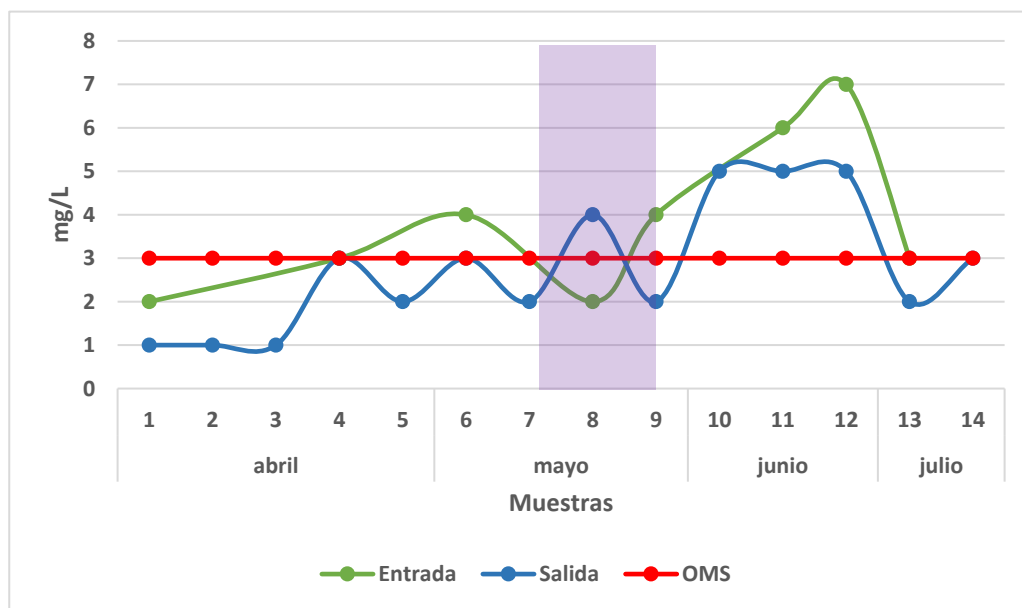


Figura 5.11 Comportamiento de la DBO<sub>5</sub> en las pruebas del FBA

- Sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sólidos volátiles.

Se realizaron dos análisis en muestras de entrada y salida, una al inicio y otra final del proyecto, lo anterior debido a que en el primer análisis se obtuvieron resultados poco representativos. Los valores se reportan en la tabla 5.3, obteniendo para los sólidos totales 140 mg/L en el agua de entrada y 150 mg/L después de pasar por el filtro. En cuanto a los sólidos suspendidos se reportan 0 mg/L, lo que se debe a los bajos niveles de turbidez presentes en las muestras de agua.

Los valores reportados tanto para el agua de entrada como el agua filtrada cumplen con el límite establecido de 1,000 mg/L por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021.

Tabla 5.3 Resultados obtenidos de evaluación de sólidos

	Sólidos totales	Sólidos Disueltos Totales	Sólidos Suspendidos Totales	Sólidos Volátiles Totales
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L
Entrada	140	113	0	27
Salida	150	135	0	15

- Coliformes totales y *E. coli*

Todas las pruebas presuntivas realizadas para el agua de entrada resultaron positivas (Fig. 5.12), por lo que se procedió al análisis con las placas Petrifilm. Al final del documento se anexan fotografías de las pruebas (Anexo II).

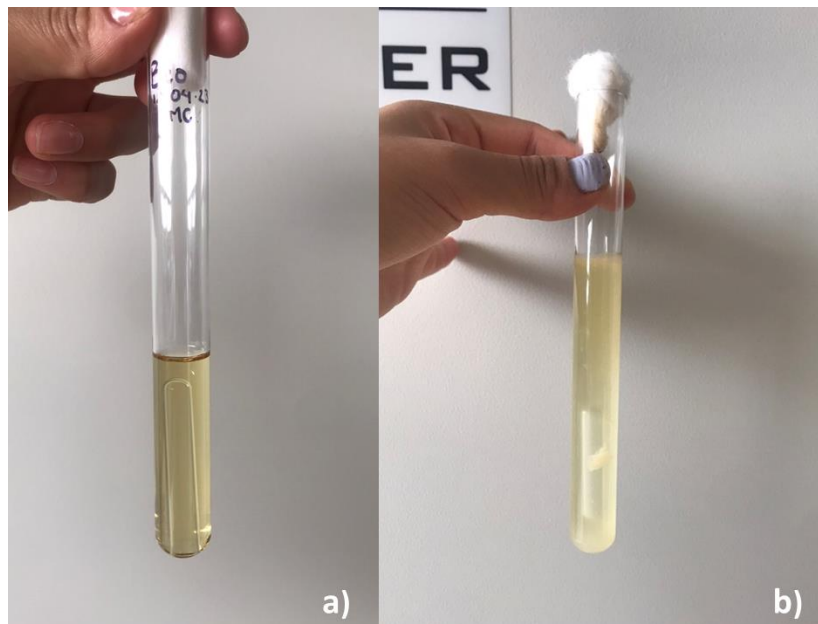


Figura 5.12 Prueba presuntiva a) blanco con medio de cultivo. b) prueba positiva con burbuja de gas en la campana de Durham

Para el análisis de los coliformes totales se utilizó la media geométrica, registrando un promedio de 53,754 UFC/100 ml en el agua de entrada y 41,783 UFC/100 ml en el agua de salida. En la Fig. 5.13 se puede observar que el primer día de evaluación se registró menos de 1000 UFC/ 100 ml posiblemente al enjuague del material filtrante, la línea naranja representa el agua de entrada, mientras que la línea azul el agua de salida. No obstante, en la muestra dos se incrementan los valores, siendo más altos que los reportados a la entrada, lo que puede indicar la estabilización del filtro y la ausencia de la biocapa. A finales de abril los

valores comienzan a descender, sin embargo, coincidiendo con la fuga reportada en el filtro, a partir de la muestra 8 los valores vuelven a incrementar siendo mayores a la salida que en la entrada, es posible que la fuga ocasionará la pérdida de la biocapa y un nuevo periodo de estabilización en el filtro. Los resultados no cumplen con el límite permisible de <1 UFC/100 ml establecido por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (marcado con la línea roja en la figura).

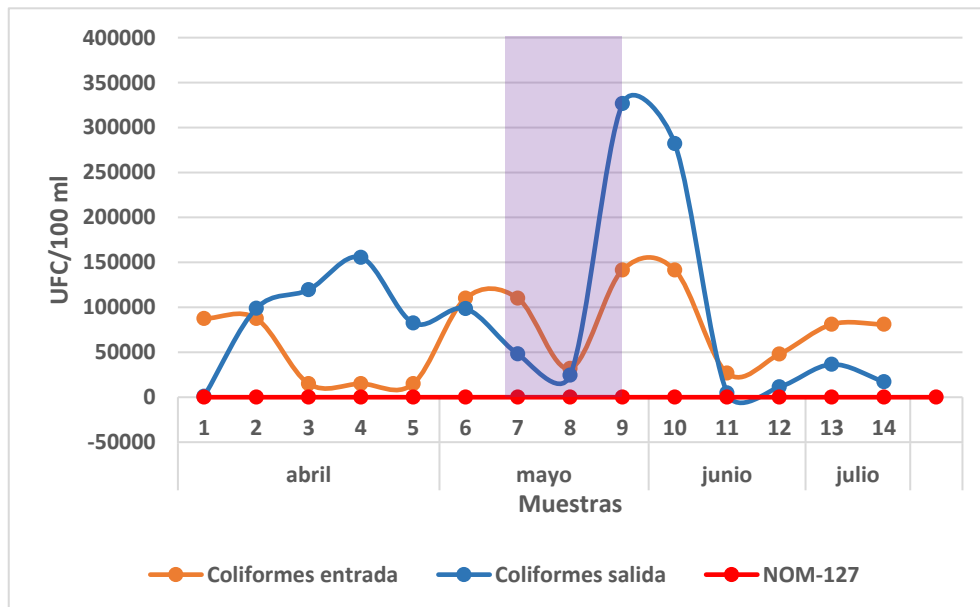


Figura 5.13 Comportamiento de coliformes en las pruebas del FBA.

En la Fig. 14 se presentan las reducciones  $Log_{10}$  de coliformes totales, en él se observa el aumento descrito al inicio del proyecto y después de la fuga, sin embargo, se calculó una tasa de reducción del 11%, menor al 90-98% reportado por (Elliott et al., 2008).

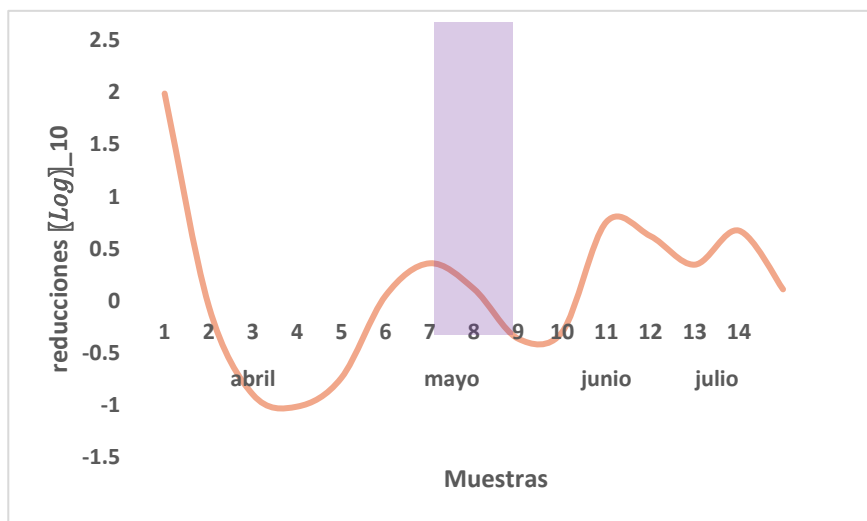


Figura 5.14 Reducción de coliformes totales

Respecto al *E. coli*, se registró un promedio de 671 UFC/100 ml para el agua de entrada. Como se observa en la Fig. 5.15 a principios del mes de mayo los valores incrementan en la entrada debido a que la temporada de lluvias inicio tarde en el mes de mayo, con lluvias poco frecuentes, lo que limitó el aumento del volumen de agua e incremento de los microorganismos presentes en la muestra; también se observa que a finales de junio la cantidad de microorganismos aumenta debido posiblemente a que las lluvias también fueron poco frecuentes a final de mes. En cuanto al análisis del agua de salida, se obtuvo un promedio de 28 UFC/100 ml, logrando una remoción del 95% similar a lo reportado por Elliott et al. (2008). A partir de la muestra 11 se reportó un incremento en la aparición de *E.coli*, esto posiblemente a que las placas Petri Film se pudieron contaminar debido a que se detectó una fisura en el empaque provocando humedad durante la refrigeración.

En general, el agua filtrada no cumple con la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, que establecen que *E. coli* no debe ser detectable en ninguna muestra de 100 mL (es decir, 0 UFC/100mL).

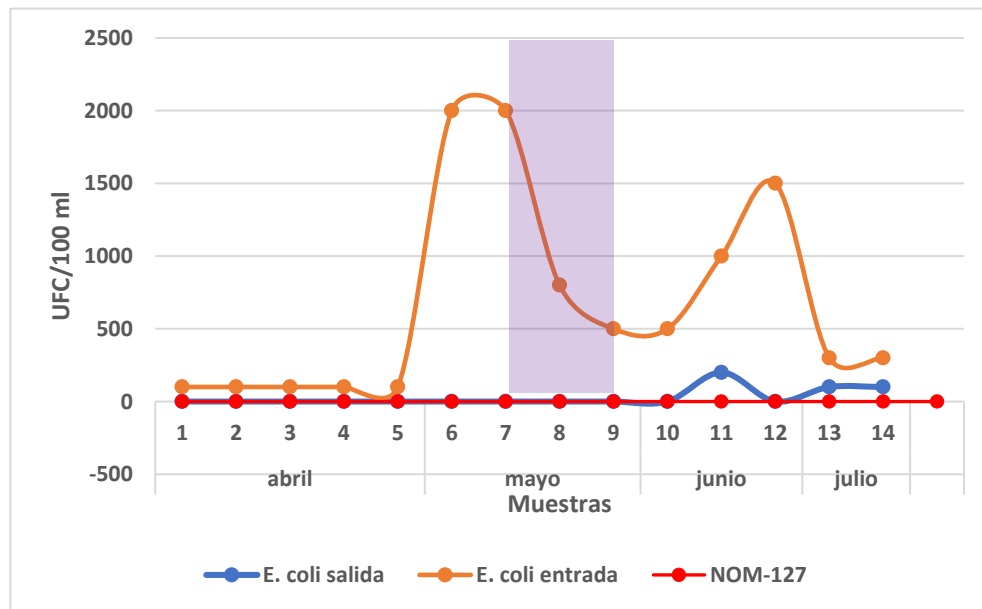


Figura 5.15 Comportamiento de *E. coli* en las pruebas del FBA.

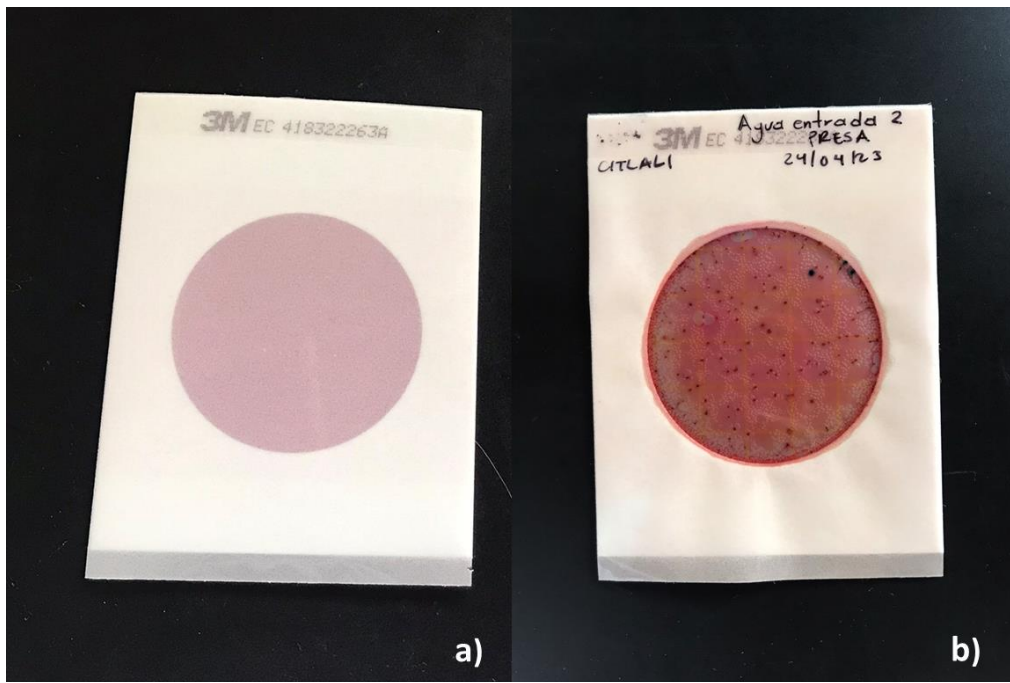


Figura 5.16 Resultados de placas Petrifilm. a) Placa limpia. b) placa con resultados positivos de coliformes (puntos rojos) y *E. coli* (puntos azules).

#### 5.4. Análisis de la biocapa con microscopía electrónica de barrido

El primer análisis se realizó al inicio del proyecto, en la Fig. 5.17 y 5.19 se puede observar los granos de la marmolina limpios y los bordes de los cristales definidos, al realizar un acercamiento se observa que la superficie de los granos está limpia, sin ningún material depositado (fig. 5.18).

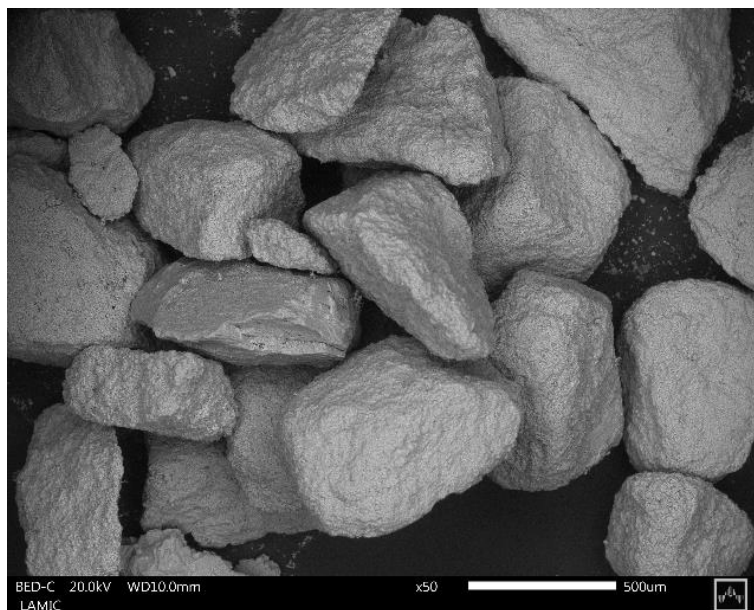


Figura 5.17 Micrografía de los granos de marmolina tiempo 0.

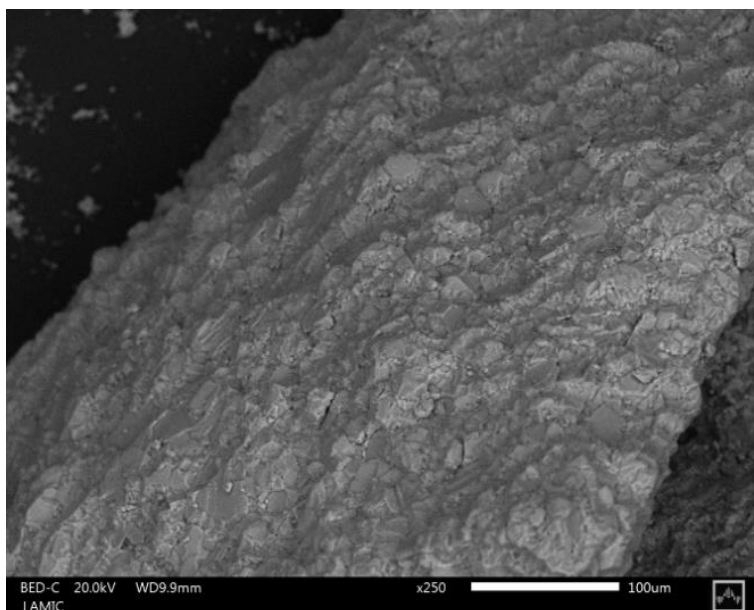


Figura 5.18 Acercamiento a la superficie de un grano de marmolina limpio

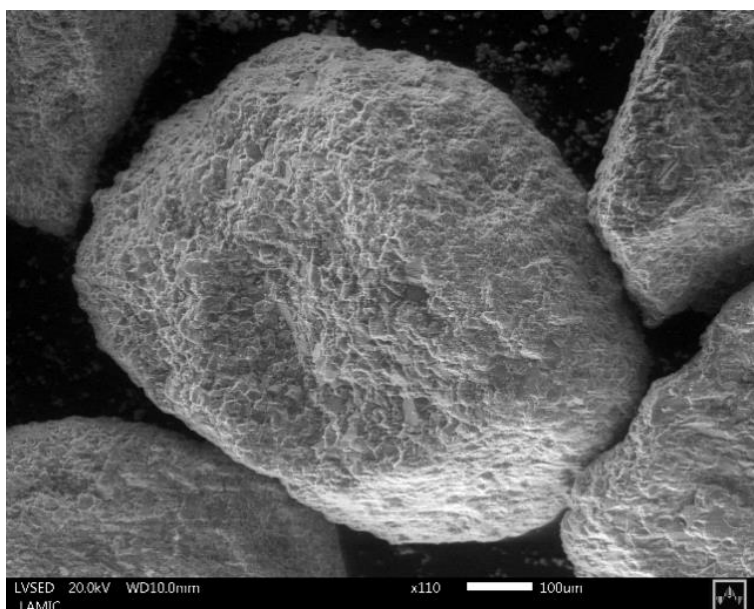
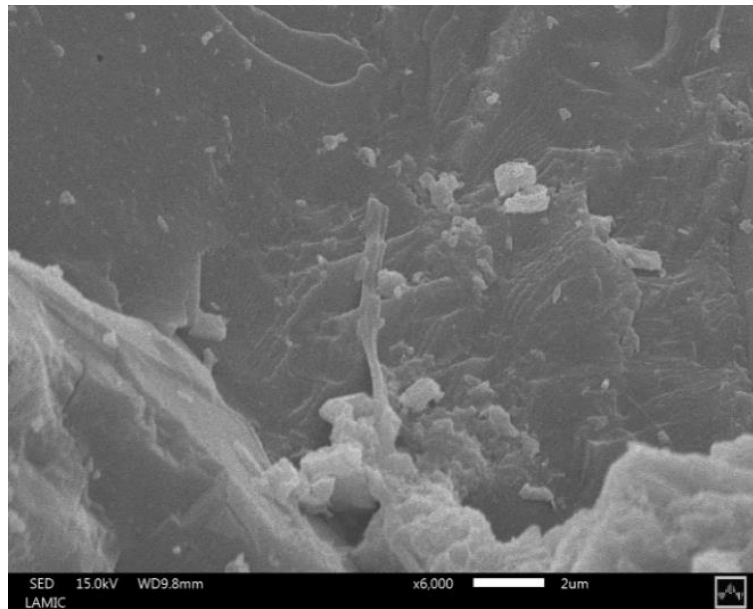


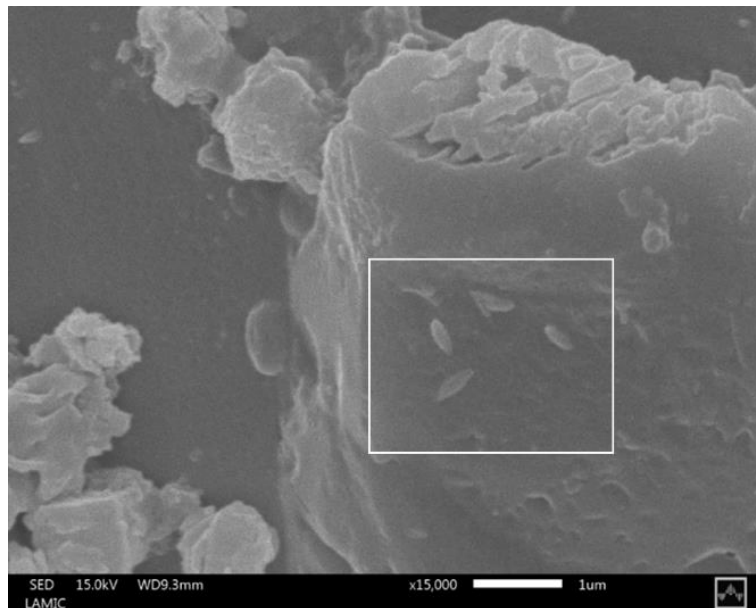
Figura 5.19 Micrografía de los granos de arena tiempo 0.

Después de un mes de funcionamiento, se logró observar material biológico en la superficie de los granos de marmolina y la presencia de microorganismos rectos o ligeramente curvados (Fig. 5.20), los cuales, al realizar una búsqueda bibliográfica, probablemente coincida con el género de *Pseudomonas*. Los bordes de los cristales se pueden observar desgastados debido a la posible fricción de las partículas de marmolina con el flujo del agua filtrada (fig. 5.21).





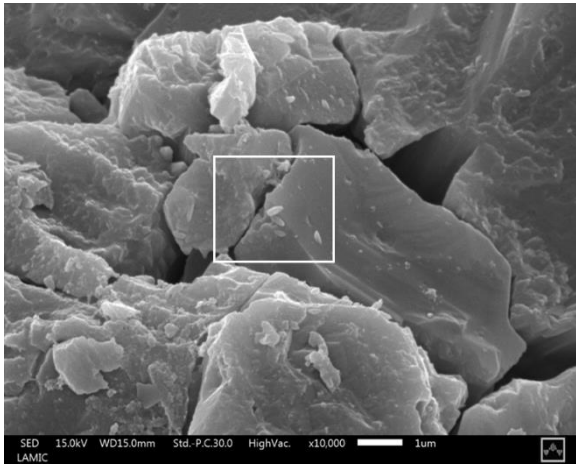
*Figura 5.20 Fragmentación de los cristales de la marmolina*



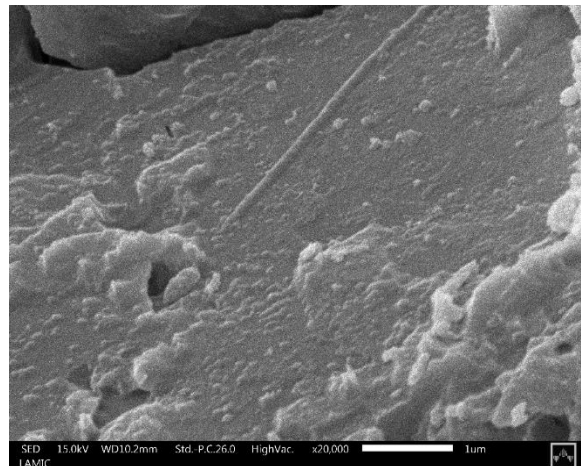
*Figura 5.21 Microorganismos en la superficie de los granos después de un mes de funcionamiento. En el recuadro blanco se observan microorganismos.*

Al final del proyecto, se observó la presencia de microorganismos similares a los observados en el primer mes (Fig. 5.22 ). Después de cuatro meses de funcionamiento la superficie de los granos estaba cubierta de material extracelular y microorganismos lo que sugiere que la biocapa ya estaba establecida (Fig. 5.23). En la Fig. 24 se observa lo que podría ser sustancias poliméricas extracelulares o mucilago secretado por las bacterias presentes. Resulta importante mencionar en este último análisis se procedió a la fijación y deshidratación de las

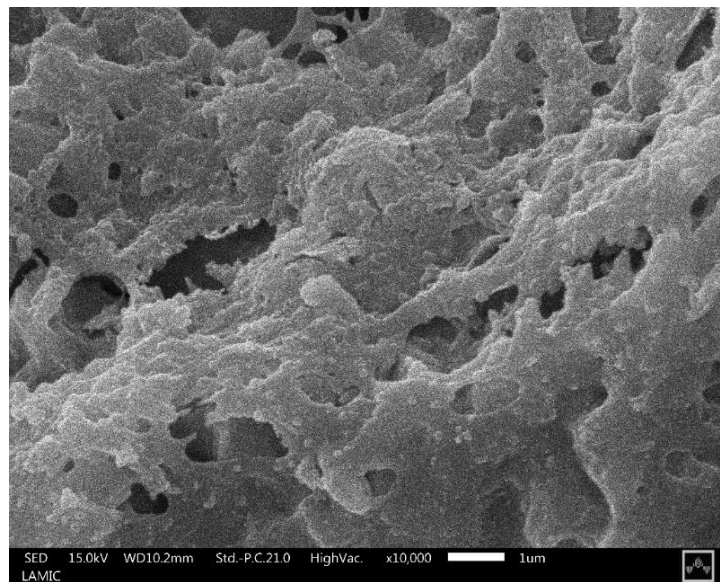
muestras, lo que podría alterar y/o distorsionar el material biológico. Especialmente la deshidratación y el secado han demostrado comprometer la calidad y la integridad estructural de las muestras biológicas y/o el colapso de la matriz extracelular, ya que hasta el 97% de la matriz de una biopelícula está compuesta de agua. La biocapa de un filtro es un entorno altamente complejo y especializado; la función y actividad de cada uno de los microorganismos de la biocapa aún no se ha determinado.



*Figura 5.22 Micrografía de la marmolina al cuarto mes, en el recuadro del centro se observan microorganismos adheridos.*



*Figura 5.23 Micrografía de superficie de la marmolina embebida por material extracelular y microorganismos.*



*Figura 5.24 Micrografía del material extracelular o mucilago secretado por bacterias que envuelve a los granos de marmolina.*

## 6. Conclusiones

- Con base en las pruebas realizadas en laboratorio se logró identificar un buen desempeño del prototipo de FBA en un corto plazo, lo cual podría funcionar a largo plazo.
- El caudal, la tasa de filtración y el RTH obtenido en el diseño del FBA funcionaron dentro del rango prescrito en varios modelos de filtración.
- Con el uso de la marmolina como medio filtrante, se determinó la mejora de la calidad del agua de la presa de Cointzio, con base en los parámetros evaluados.
- El FBA reduce las concentraciones de pH, alcalinidad, dureza, conductividad eléctrica y la salinidad, sin embargo, los resultados no superan los límites permisibles establecidos por la OMS y la NOM-127-SSA1-2021 para cada parámetro.
- La turbidez y la DBO<sub>5</sub> no rebasaron los límites establecidos por la normatividad, incluso se presentó una disminución en los valores obtenidos en las pruebas del FBA.
- Los coliformes totales y *E. coli* presentaron una disminución a lo largo de las pruebas del FBA, pero no una eliminación total.
- Los parámetros evaluados en el trabajo indican una maduración de la biocapa a lo largo del periodo de uso, se evidencia de manera puntual en las reducciones de caudal y el aumento de la eficiencia de eliminación bacteriana.
- Las micrografías SEM muestran que existe un desarrollo de la biocapa a partir del primer mes de funcionamiento del FBA, con una estructura más notable al cuarto mes.
- La calidad del agua en la fase inicial (4 a 6 semanas) que no permiten garantizar agua segura a los usuarios, debido a que no hay una maduración de la biocapa.
- Se debe capacitar a los usuarios sobre las prácticas adecuadas de mantenimiento y limpieza del FBA para proteger el agua tratada de la contaminación microbiana.
- Al ser escasa la bibliografía sobre los FBA y su evaluación, este trabajo brinda una pauta para su monitoreo constante; es importante que las afirmaciones sobre la eliminación de contaminantes se hagan con precaución.

## ***7. Recomendaciones***

- El barro resulto ser un buen material como contenedor, sin embargo, se deberán hacer cálculos para determinar el espesor del contenedor suficiente para que pueda soportar la presión del material filtrante y el agua, además, que su elaboración deberá ser de una sola pieza y no armada por partes, para que le proporcione la resistencia necesaria y se complemente con un enjarre.
- Es importante realizar mediciones del diámetro efectivo del material filtrante para estimar el tamaño de las partículas más pequeñas, ya que éstas tienden a ocupar espacios porosos entre las partículas de mayor tamaño que restringen el flujo a través del filtro.
- Se recomienda analizar previamente la calidad del agua de la fuente, además de considerar las condiciones climáticas, geológicas y ambientales del lugar antes de filtrar el agua en el FBA.
- Realizar monitoreos con esta misma agua en el FBA donde se realicen evaluaciones en distintas épocas del año y se aumenten el número de parámetros de calidad de agua a determinar, como son el oxígeno disuelto, nitratos, nitritos , fosfatos, metales pesados, etc.
- Para aumentar la seguridad microbiológica, es recomendable utilizar un método de desinfección a la hora de almacenar el agua filtrada, el uso de cloro (2 gotas/L) puede ser útil para proteger el suministro de agua.
- Se recomienda que para investigaciones futuras se incluya una correlación entre las micrografías de la biocapa, los estudios de la actividad de los microorganismos y el análisis de la calidad del agua del FBA.

## 8. Bibliografía

- Alatorre Cázares, J. S. (2020). Evaluación del potencial de contaminantes en el agua de la presa Cointzio por efecto de nutrientes de fuentes de contaminación puntuales y difusas. [http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB\\_UMICH/4636](http://bibliotecavirtual.dgb.umich.mx:8083/xmlui/handle/DGB_UMICH/4636)
- Amirtharajah, A. (1988). Some Theoretical and Conceptual Views of Filtration. *Journal (American Water Works Association)*, 80(12), 36-46.
- Arroyo Sesento, E. (2020). La presa de Cointzio: Un proveedor de agua y energía, perturbado.
- Bailey, E. S., Beetsch, N., Wait, D. A., Oza, H. H., Ronnie, N., & Sobsey, M. D. (2021). Methods, Protocols, Guidance and Standards for Performance Evaluation for Point-of-Use Water Treatment Technologies: History, Current Status, Future Needs and Directions. *Water*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w13081094>
- Ávila, J. A., & Garduño, V. H. (2007). Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuifero de Morelia. *Ciencia Nicolaita*, 46, 105-122.
- Bain, R., Cronk, R., Wright, J., Yang, H., Slaymaker, T., & Bartram, J. (2014). Fecal Contamination of Drinking-Water in Low- and Middle-Income Countries: A Systematic Review and Meta-Analysis. *PLOS Medicine*, 11(5), e1001644. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001644>
- Beard, V. A., & Mitlin, D. (2021). Water access in global South cities: The challenges of intermittency and affordability. *World Development*, 147, 105625. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105625>
- Bhateria, R., & Jain, D. (2016). Water quality assessment of lake water: A review. *Sustainable Water Resources Management*, 2(2), 161-173. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0014-7>
- Bisung, E., & Elliott, S. J. (2016). Psychosocial impacts of the lack of access to water and sanitation in low- and middle-income countries: A scoping review. *Journal of Water and Health*, 15(1), 17-30. <https://doi.org/10.2166/wh.2016.158>
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. gabriela, & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289-299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Buzunis, B. J. (1995). Intermittently operated slow sand filtration: A new water treatment process [Master thesis, University of Calgary]. <https://doi.org/10.11575/PRISM/18990>
- Camacho-Galván, M.N., and Reygadas Robles Gil, F. (2019). Evaluación del programa para la sostenibilidad de los servicios de agua potable y saneamiento en comunidades rurales (PROSSAPYS) [Evaluation of the program for sustainability of potable water and sanitation service in rural communities]. In *Hacia el cumplimiento del Derecho Humano al Agua. Arsénico y fluoruro en agua: riesgos y perspectivas desde la sociedad civil y la academia en México* [Towards compliance of the human right to water. Arsenic and flour in water: risks and perspectives from civil society and academia in Mexico] (vol. 1). Mexico: SEGOB/CHMAS, p. 150.
- CAWST. (2012, agosto). Biosand Filter Construction Manual | WASH Resources. <https://washresources.cawst.org/en/resources/b6be2637/biosand-filter-construction-manual>
- Cescon, A., & Jiang, J.-Q. (2020). Filtration Process and Alternative Filter Media Material in Water Treatment. *Water*, 12(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/w12123377>
- Chan, S., Pullerits, K., Riechelmann, J., Persson, K. M., Rådström, P., & Paul, C. J. (2018). Monitoring biofilm function in new and matured full-scale slow sand filters using flow cytometric histogram image comparison (CHIC). *Water Research*, 138, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.03.032>
- Chawla, I., Karthikeyan, L., & Mishra, A. K. (2020). A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes. *Journal of Hydrology*, 585, 124826. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124826>
- Clasen, T. F., Alexander, K. T., Sinclair, D., Boisson, S., Peletz, R., Chang, H. H., Majorin, F., & Cairncross, S. (2015). Interventions to improve water quality for preventing diarrhoea. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 10. <https://doi.org/10.1002/14651858.cd004794.pub3>
- De Vargas, L. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano en plantas de filtración rápida. Lima, Perú: OPS/CEPIS, 1, 265-298.

- Demir, N. M., Atci, E. B., Demir, S., & Karadeniz, A. (2018). Investigating Biomass Formations at Different Depths in a Slow Sand Filter. *Polish Journal of Environmental Studies*, 27(4), 1463-1474. <https://doi.org/10.15244/pjoes/76793>
- Deshpande, A., Miller-Petrie, M. K., Lindstedt, P. A., Baumann, M. M., Johnson, K. B., Blacker, B. F., Abbastabar, H., Abd-Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahpour, I., Abegaz, K. H., Abejie, A. N., Abreu, L. G., Abrigo, M. R. M., Abualhasan, A., Accrombessi, M. M. K., Adamu, A. A., Adebayo, O. M., Adedeji, I. A., ... Reiner, R. C. (2020). Mapping geographical inequalities in access to drinking water and sanitation facilities in low-income and middle-income countries, 2000–17. *The Lancet Global Health*, 8(9), e1162-e1185. [https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(20\)30278-3](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(20)30278-3)
- Doan, P. T. K., Némery, J., Schmid, M., & Gratiot, N. (2015). Eutrophication of turbid tropical reservoirs: Scenarios of evolution of the reservoir of Cointzio, Mexico. *Ecological Informatics*, 29, 192-205. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.01.006>
- Duran Romero, D. A., de Almeida Silva, M. C., M. Chaúque, B. J., & D. Benetti, A. (2020). Biosand Filter as a Point-of-Use Water Treatment Technology: Influence of Turbidity on Microorganism Removal Efficiency. *Water*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w12082302>
- Elliott, M. A., Stauber, C. E., Koksai, F., DiGiano, F. A., & Sobsey, M. D. (2008). Reductions of *E. coli*, echovirus type 12 and bacteriophages in an intermittently operated household-scale slow sand filter. *Water Research*, 42(10), 2662-2670. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.01.016>
- Emslie, D., Siddiqua, S., Crawford, B., & Teece, W. (2022). Biofilm Formation and Effectiveness of Biosand Filtration Systems with Typical and Innovative Filter Media. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40(3), 1251-1266. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01960-3>
- Espinosa Bouchot, M., & Vázquez Villanueva, S. (2011). Evaluación de biofiltros de arena como sistemas de desinfección unifamiliares en comunidades rurales [workingPaper]. IMTA. Coordinación de Hidráulica. Subcoordinación de Tecnología Apropiada e Industrial. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1479>
- Fontela, M., Velo, A., Brown, P. J., & Pérez, F. F. (2023). Carbonate System Species and pH. En J. Blasco & A. Tovar-Sánchez (Eds.), *Marine Analytical Chemistry* (pp. 1-37). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14486-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14486-8_1)
- Flores Díaz, A. C., Chávez Mejía, A., Hansen, A. M., González Reynoso, A., Casasola, B., Jiménez Cisneros, B., ... & Garrido Hoyos, S. E. (2019). Calidad del agua en México.
- Freitas, B. L. S., Terin, U. C., Fava, N. M. N., Maciel, P. M. F., Garcia, L. A. T., Medeiros, R. C., Oliveira, M., Fernandez-Ibañez, P., Byrne, J. A., & Sabogal-Paz, L. P. (2022). A critical overview of household slow sand filters for water treatment. *Water Research*, 208, 117870. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117870>
- García-Estrada, L., Hernández-Guerrero, J., García-Estrada, L., & Hernández-Guerrero, J. (2020). Ciclo hidrosocial y acceso al agua en la periferia de la ciudad de Morelia, México: Estudio de caso en La Aldea. *Revista Geográfica de América Central*, 64, 245-273. <https://doi.org/10.15359/rgac.64-1.10>
- Gaytán-Alarcón, A. P., González-Elizondo, M. S., Sánchez-Ortíz, E., & Alarcón-Herrera, M. T. (2022). Comparative assessment of water quality indices—A case study to evaluate water quality for drinking water supply and irrigation in Northern Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 588. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10198-2>
- González Camacho, A. (2003). Unidad didáctica para la aplicación de la norma NOM-127-SSA1-1994, salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. IMTA. Coordinación de Tecnología Hidráulica. <http://repositorio.imta.mx/handle/20.500.12013/1177>
- Haig, S. J., Collins, G., Davies, R. L., Dorea, C. C., & Quince, C. (2011). Biological aspects of slow sand filtration: Past, present and future. *Water Supply*, 11(4), 468-472. <https://doi.org/10.2166/ws.2011.076>
- Hamouda, M. A., Anderson, W. B., & Huck, P. M. (2012). Employing multi-criteria decision analysis to select sustainable point-of-use and point-of-entry water treatment systems. *Water Supply*, 12(5), 637-647. <https://doi.org/10.2166/ws.2012.035>
- Harrison, M. D. (2016). Water Quality. En M. J. Kennish (Ed.), *Encyclopedia of Estuaries* (pp. 729-730). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4\\_121](https://doi.org/10.1007/978-94-017-8801-4_121)

- Hassfurter, K. (2017, julio 12). Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene: 2017 update and SDG baselines. UNICEF DATA. <https://data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-hygiene-2017-update-sdg-baselines/>
- Huisman, L., & Wood, W. E. (1974). Slow sand filtration. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/38974>
- Hwang, H. G., Kim, M. S., Shin, S. M., & Hwang, C. W. (2014). Risk Assessment of the Schmutzdecke of Biosand Filters: Identification of an Opportunistic Pathogen in Schmutzdecke Developed by an Unsafe Water Source. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ijerph110202033>
- Ives, K. J. (1970). Rapid filtration. *Water Research*, 4(3), 201-223. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(70\)90068-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(70)90068-0)
- Jegatheesan, V., & Vigneswaran, S. (2005). Deep Bed Filtration: Mathematical Models and Observations. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 35(6), 515-569. <https://doi.org/10.1080/10643380500326432>
- Jenkins, M. W., Tiwari, S. K., & Darby, J. (2011). Bacterial, viral and turbidity removal by intermittent slow sand filtration for household use in developing countries: Experimental investigation and modeling. *Water Research*, 45(18), 6227-6239. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.022>
- Kubare, M., & Haarhoff, J. (2010). Rational design of domestic biosand filters. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 59(1), 1-15. <https://doi.org/10.2166/aqua.2010.008>
- Lazarova, V., & Manem, J. (1995). Biofilm characterization and activity analysis in water and wastewater treatment. *Water Research*, 29(10), 2227-2245. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(95\)00054-O](https://doi.org/10.1016/0043-1354(95)00054-O)
- Lynn, T. J., Wanjugi, P., Harwood, V. J., & Ergas, S. J. (2013). Dynamic performance of biosand filters. *Journal AWWA*, 105(10), E587-E595. <https://doi.org/10.5942/jawwa.2013.105.0116>
- Maciel, P. M. F., & Sabogal-Paz, L. P. (2020). Household slow sand filters with and without water level control: Continuous and intermittent flow efficiencies. *Environmental Technology*, 41(8), 944-958. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1515988>
- Mahaffy, N. C. (2014). Effects of Physical Disturbances on BioSand Filters Used for Point-of-Use Water Treatment [Thesis]. <https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/13965>
- matuzahroh, N., Fitriani, N., Ardiyanti, P. E., Kuncoro, E. P., Budiyo, W. D., Isnadina, D. R. M., Wahyudianto, F. E., & Radin Mohamed, R. M. S. (2020). Behavior of schmutzdecke with varied filtration rates of slow sand filter to remove total coliforms. *Heliyon*, 6(4), e03736. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03736>
- Mostafa, S., Camacho-Galván, M. N., Castelán-Martínez, H. E., Galdos-Balzategui, A., & Reygadas, F. (2021a). A Hybrid Centralized-Point-of-Use Drinking Water Treatment System in a Rural Community in Chiapas, Mexico. *Environmental Engineering Science*, 38(5), 418-429. <https://doi.org/10.1089/ees.2020.0245>
- Mostafa, S., Camacho-Galván, M. N., Castelán-Martínez, H. E., Galdos-Balzategui, A., & Reygadas, F. (2021b). A Hybrid Centralized-Point-of-Use Drinking Water Treatment System in a Rural Community in Chiapas, Mexico. *Environmental Engineering Science*, 38(5), 418-429. <https://doi.org/10.1089/ees.2020.0245>
- Mukheibir, P. (2010). Water Access, Water Scarcity, and Climate Change. *Environmental Management*, 45(5), 1027-1039. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9474-6>
- Murphy, H. M., McBean, E. A., & Farahbakhsh, K. (2010). A critical evaluation of two point-of-use water treatment technologies: Can they provide water that meets WHO drinking water guidelines? *Journal of Water and Health*, 8(4), 611-630. <https://doi.org/10.2166/wh.2010.156>
- Nakamoto, N., Graham, N., & Gimbel, R. (2014). Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes. IWA Publishing.
- Napotnik, J. A., Baker, D., & Jellison, K. L. (2021). Influence of sand depth and pause period on microbial removal in traditional and modified biosand filters. *Water Research*, 189, 116577. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116577>
- Némery, J., Gratiot, N., Doan, P. T. K., Duvert, C., Alvarado-Villanueva, R., & Duwig, C. (2016). Carbon, nitrogen, phosphorus, and sediment sources and retention in a small eutrophic tropical reservoir. *Aquatic Sciences*, 78(1), 171-189. <https://doi.org/10.1007/s00027-015-0416-5>
- OECD, & Organization, W. H. (2003). Assessing Microbial Safety of Drinking Water Improving Approaches and Methods: Improving Approaches and Methods. OECD Publishing.

- O'Melia, C. r. (1985). Particles, pretreatment, and performance in water filtration. *Journal of Environmental Engineering (United States)*, 111(6), 874-890. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1985\)111:6\(874\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1985)111:6(874))
- O'Melia, C. R., & Stumm, W. (1967). Theory of Water Filtration. *Journal (American Water Works Association)*, 59(11), 1393-1412.
- Organización de las Naciones Unidas (OMS) (2010a). Declaration on the right to water. A/RES/64/292. General Assembly, New York: UN. <http://www.un.org/en/ga/64/resolutions.shtml>. Accessed 14 Oct 2014.
- Organización de las Naciones Unidas (OMS) (2010b). Human rights and access to safe drinking water and sanitation. A/HRC/RES/15/9. New York: UN. <http://daccess-dds-n>
- Organización de las Naciones Unidas (OMS) (2011) Guidelines for drinking water quality, Health Criteria, and other supporting information, 2nd ed., 367–370. Geneva: WHO.
- Otiz-Moreno, J. A. O., Cerutti, O. R. M., & Gutiérrez, A. F. F. (2014). LA ECOTECNOLOGÍA EN MÉXICO. IMAGIA.
- Ortiz-Moreno, J. A. O., Solís, V. S., & Zambrano, T. I. A. (2015). La ecotecnología en Michoacán.
- Pérez-López, E. (2016). Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 29(3), 3-14. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i3.2884>
- Phillips, J. A., & Smidt, S. J. (2020). Modeling Improved Performance of Reduced-Height Biosand Water Filter Designs. *Water*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/w12051337>
- Pond, K. (2019). Water Quality. En C. W. Finkl & C. Makowski (Eds.), *Encyclopedia of Coastal Science* (pp. 1841-1847). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6\\_340](https://doi.org/10.1007/978-3-319-93806-6_340)
- Pooi, C. K., & Ng, H. Y. (2018). Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities. *Npj Clean Water*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0011-0>
- Primasari, B., Indah, S., Afrianita, R., & Rahmatesa, F. (2020). Biosand Filter for Removal of Organic Pollutant from Laboratory Wastewater. *Journal of Physics: Conference Series*, 1625(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012057>
- Ranjan, P., & Prem, M. (2018). Schmutzdecke- A Filtration Layer of Slow Sand Filter. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7, 637-645. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.077>
- Reddy, S., Barbhuiya, N. H., & P. Singh, S. (2022). Point-of-Use Drinking Water Treatment Systems and Their Performance in Removal of Emerging Contaminants. En S. P. Singh, A. K. Agarwal, T. Gupta, & S. M. Maliyekkal (Eds.), *New Trends in Emerging Environmental Contaminants* (pp. 463-485). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-8367-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-981-16-8367-1_19)
- Revollo-Fernández, D. A., & Rodríguez-Tapia, L. (2021). Unequal Access to Water and Its Affordability for Households in Mexico. *Journal of Poverty*, 0(0), 1-15. <https://doi.org/10.1080/10875549.2021.1955807>
- Rijsberman, F. R. (2006). Water scarcity: Fact or fiction? *Agricultural Water Management*, 80(1), 5-22. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
- Rodríguez, m. B. E., & barriga, g. M. La dotación de agua y sus retos en la administración del sur de Morelia, Michoacán, México 2019-2020. *Gestión comunitaria del agua*, 61.
- Santos, J., Pagsuyoin, S. A., & Latayan, J. (2016). A multi-criteria decision analysis framework for evaluating point-of-use water treatment alternatives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18(5), 1263-1279. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-1066-y>
- Shah, D., & Pitroda, Dr. J. (2013). ASSESSMENT FOR USE OF GRAVEL IN PERVIOUS CONCRETE. 4, 4306-4310.
- Simoni Balen, D. (2018). Enhancing E. coli Removal from Slow-Rate Biofilters Treating Low-Carbon Source Waters [M.Eng.]. <https://www.proquest.com/docview/2176437839/abstract/9EAA9C3AAA9A46D2PQ/1>
- Sobsey, M. D., Stauber, C. E., Casanova, L. M., Brown, J. M., & Elliott, M. A. (2008). Point of Use Household Drinking Water Filtration: A Practical, Effective Solution for Providing Sustained Access to Safe Drinking Water in the Developing World. *Environmental Science & Technology*, 42(12), 4261-4267. <https://doi.org/10.1021/es702746n>
- Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., Mora-Alvarado, D., Solís-Castro, Y., Zúñiga-Zúñiga, L. A., & Mora-Alvarado, D. (2018). La conductividad como parámetro predictivo de la dureza del agua en



- pozos y nacientes de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, 31(1), 35-46. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3495>
- Stauber, C. E., Elliott, M. A., Koksall, F., Ortiz, G. M., DiGiano, F. A., & Sobsey, M. D. (2006). Characterisation of the biosand filter for *E. coli* reductions from household drinking water under controlled laboratory and field use conditions. *Water Science and Technology*, 54(3), 1-7. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.440>
- Summers, J. K. (2020). *Water Quality: Science, Assessments and Policy. BoD – Books on Demand.*
- Sutadian, A. D., Muttill, N., Yilmaz, A. G., & Perera, B. J. C. (2015). Development of river water quality indices—A review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(1), 58. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0>
- Tiwari, S.-S. K., Schmidt, W.-P., Darby, J., Kariuki, Z. G., & Jenkins, M. W. (2009). Intermittent slow sand filtration for preventing diarrhoea among children in Kenyan households using unimproved water sources: Randomized controlled trial. *Tropical Medicine & International Health*, 14(11), 1374-1382. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3156.2009.02381.x>
- Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.
- Tzanakakis, V. A., Paranychianakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2020). Water Supply and Water Scarcity. *Water*, 12(9), Article 9. <https://doi.org/10.3390/w12092347>
- Unger, M., & Collins, M. R. (2008). Assessing *Escherichia coli* removal in the schmutzdecke of slow-rate biofilters. *Journal - American Water Works Association*, 100(12), 60-73. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2008.tb09799.x>
- Verma, S., Daverey, A., & Sharma, A. (2017). Slow sand filtration for water and wastewater treatment – a review. *Environmental Technology Reviews*, 6(1), 47-58. <https://doi.org/10.1080/21622515.2016.1278278>
- Vliet, M. T. H. van, Jones, E. R., Flörke, M., Franssen, W. H. P., Hanasaki, N., Wada, Y., & Yearsley, J. R. (2021). Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024020. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbfc3>
- Vohidovna, O. D. (2022). Medical and Social Significance of Water Supply, Sanitation and Hygiene in Human Activity. *Vital Annex: International Journal of Novel Research in Advanced Sciences*, 1(1), Article 1.
- Weber-Shirk, M. L., & Dick, R. I. (1997). Physical-chemical mechanisms in slow sand filters. *American Water Works Association. Journal*, 89(1), 87.
- Whittig, L. D., & Allardice, W. R. (2018). X-Ray Diffraction Techniques. En A. Klute (Ed.), *SSSA Book Series* (pp. 331-362). Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.1.2ed.c12>
- Yao, K.-M., Habibian, M. T., & O'Melia, C. R. (1971). Water and wastewater filtration. Concepts and applications. *Environmental Science & Technology*, 5(11), 1105-1112. <https://doi.org/10.1021/es60058a005>

## *Anexo I*

### *Mecanismos de transporte*

Los filtros de arena lentos funcionan utilizando todos los mecanismos normalmente asociados a la filtración. Estos mecanismos incluyen:

- Colado

Se produce cuando la abertura entre los elementos del medio filtrante es menor que el tamaño de la partícula. Este principio se aplica a la mayoría de los diseños de filtros y está relacionado con el tamaño de las partículas, la separación entre los medios y la densidad de éstos. Las partículas demasiado grandes para caber entre los granos de arena son expulsadas por la superficie de la arena, independientemente de la velocidad de filtración (Fig. 1). A medida que se atrapan y acumulan partículas más pequeñas, se reduce el tamaño de las aberturas de los poros en la superficie de la arena, lo que permite eliminar partículas aún más pequeñas por colado (Buzunis, 1995).

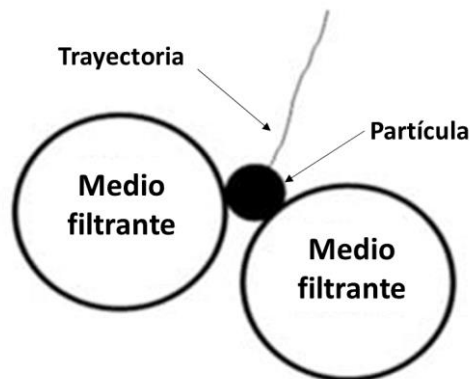


Figura 1. Colado. Las partículas quedan atrapadas entre los granos del medio filtrante. Modificada de Cescon & Jiang, 2020.

- Sedimentación

.La sedimentación se produce cuando las partículas simplemente se depositan fuera del agua. Si la densidad de la partícula en suspensión es superior a la del agua, la partícula seguirá una trayectoria diferente debido a la influencia del campo de fuerza gravitatoria. La trayectoria

de la partícula se ve influenciada por los efectos combinados del peso de empuje de la partícula y del arrastre del fluido por la partícula (Yao et al., 1971). El mecanismo de sedimentación se debe a la fuerza de gravedad y a la velocidad de sedimentación asociada de la partícula, que hace que cruce las líneas de corriente y llegue al colector (granos del filtro); asimismo la densidad de la partícula y la temperatura desempeñan papeles importantes (Fig. 2).

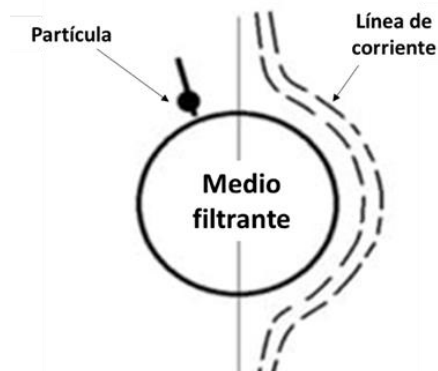


Fig. 2 Sedimentación. La partícula cruza las líneas de corriente y se deposita en el medio filtrante. Modificada de Cescon & Jiang, 2020

- Difusión

La difusión browniana o molecular se produce cuando la energía térmica del fluido se transfiere a las partículas provocando un movimiento aleatorio. Esto hace que se desvíen de las líneas de corriente para impactar en la superficie del grano o en otras partículas (Fig. 3).

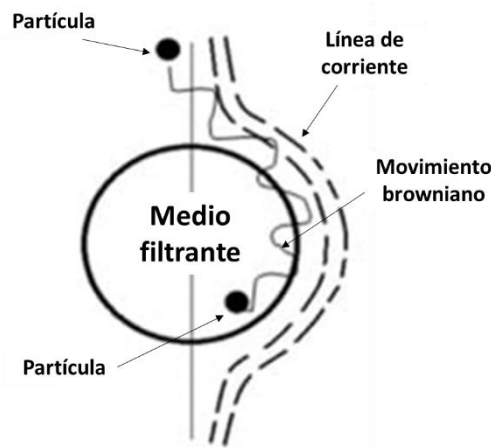


Fig. 3. Difusión La partícula es sometida a un proceso de bombardeo por las moléculas del medio, lo que da lugar al conocido movimiento browniano. Modificada de Cescon & Jiang, 2020.

- Interceptación

La interceptación se produce cuando el movimiento de las partículas a lo largo de una línea de corriente está lo suficientemente cerca del colector como para que se produzca la adhesión; esto depende de la relación entre el diámetro de la partícula y el diámetro del medio (Fig. 4). Si las partículas permanecen en líneas de corriente, que se acercan a la superficie del grano dentro de un radio de partícula, la partícula entrará en contacto con la superficie (Jegatheesan & Vigneswaran, 2005).

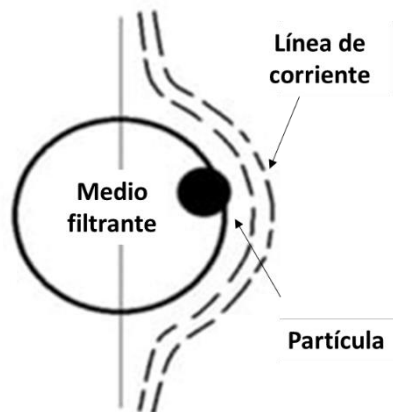


Figura 4. Interceptación. La partícula sigue la línea del flujo y entra en contacto con el medio filtrante. Modificada de Cescon & Jiang, 2020.

- Acción hidrodinámica

El mecanismo de acción hidrodinámica se debe cuando al experimentar velocidades más altas en un lado la partícula tiende a girar y crear un campo esférico adicional, desplazándose a través del campo de flujo. Este mecanismo está relacionado principalmente con la forma de la partícula y su interacción con el campo. El flujo en los poros del filtro es laminar, con un gradiente de velocidad, es decir, existe un campo de cizallamiento (Fig. 5). El campo de cizallamiento en los poros del filtro no es uniforme por lo que la partícula experimenta una rotación, con el consiguiente campo de flujo esférico y se desvía del campo, pero no de una manera uniforme predecible. Si además la partícula no es esférica, experimentará más fuerzas fuera de equilibrio que la desplazarán a través de las líneas de corriente. Debido a las formas deformables no esféricas y a las condiciones de flujo no ideales, los resultados son

trayectorias aleatorias no predecibles, que conducen al movimiento a través de las líneas de flujo y a la colisión con los granos (Cescon & Jiang, 2020; Ives, 1970).

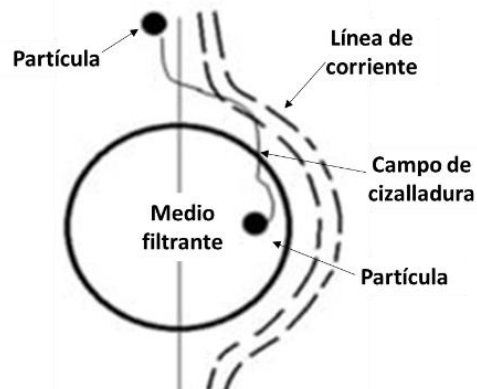


Figura 5. Acción hidrodinámica. La partícula tiende a girar y crear un campo esférico adicional. Modificada de Cescon & Jiang, 2020

### ***Mecanismos de fijación***

- Interacciones electrostáticas y eléctricas de doble capa

La atracción electrostática es el resultado de partículas con cargas opuestas. La arena de cuarzo limpia y la mayoría de las bacterias tienen carga negativa, mientras que los iones metálicos y la materia orgánica tienen carga positiva. Esta es una de las razones por las que se requiere un periodo de maduración para los filtros de arena lentos, ya que se necesita tiempo para permitir que las cargas del filtro se adapten a la fijación de la vida microbológica (Huisman & Wood, 1974).

La interacción eléctrica de doble capa supone que la interacción neta entre una partícula en suspensión y la superficie del filtro puede describirse mediante una combinación cuantitativa de la atracción de Van Der Waals con la repulsión o atracción coulombica de las dos capas dobles. En toda interfaz entre un sólido y una fase acuosa existe una doble capa eléctrica. El lado sólido de la interfaz asume una carga electrostática (la carga primaria) que puede ser positiva o negativa.

- Fuerzas de London-Van Der Waals

Los momentos dipolares instantáneos generados por la distribución asimétrica temporal de los electrones alrededor de los núcleos atómicos producen la fuerza de London-Van Der

Waals. Esta fuerza es en gran medida responsable de la adhesión de las partículas y, sin ella, el efecto de retardo hidrodinámico impediría que las partículas alcancen las superficies del colector. Dado que el grano de filtro es generalmente al menos dos órdenes de magnitud más grande que la partícula, se puede suponer que la superficie del grano de filtro es plana en comparación con la partícula. Las fuerzas de Van Der Waals interactúan con la atracción/repulsión electrostática para mantener las partículas en la superficie de la arena. Las fuerzas de atracción de Van Der Waals varían con la distancia entre las partículas y superan la repulsión electrostática de partículas con cargas similares a distancias cortas. Esto permitirá que las partículas cargadas de forma similar se adhieran entre sí una vez que se haya producido una colisión y se haya superado la repulsión electrostática (Buzunis, 1995). La fuerza de London es una subcategoría de las fuerzas de Van Der Waals, es la fuerza intramolecular más débil ocasionada por la atracción entre dipolos temporales y dipolos inducidos causadas por el movimiento de los electrones en átomos y moléculas.

- Adhesión

La adhesión es el resultado del crecimiento de bacterias en los materiales orgánicos depositados en los granos de arena y en la superficie de la arena, el *schmutzdecke* (capa sucia). Las bacterias producen una sustancia viscosa formada por polímeros exocelulares y que incluye células vivas y muertas. Esta sustancia se conoce como *zoogeal* (Brock y Madigan, 1991 citado por (Buzunis, 1995) ). Esta sustancia es pegajosa y tiende a retener y absorber las partículas que entran en contacto con ella.

Anexo II

