

Tecnología y Bioeconomía



Lina Patricia Vega
Compilador

Comité editorial

Directivos

Fr. José Fernando MANCIPE, O.P.

Rector

Fr. Wilmar Yesid RUIZ CORTÉS, O.P.

Vicerrector Académico

Fr. José Arturo RESTREPO RESTREPO, O.P.

Vicerrector Administrativo-Financiero

Katherine Johana AGUJA HERRERA

Decana de Ingeniería Ambiental

Diana Mireya AYALA VALDERRAMA

Directora de la Dirección de Investigación en Innovación

Juan Carlos CANOLES VÁSQUEZ

Director Centro de Recursos Para el Aprendizaje y la Investigación

Primera edición, **2025**

ISBN: 978-628-7845-00-8

Corrección de Estilo:

Santiago Marida BORDAMALO ECHEVERRI

Diagramación:

Bertolt Rafael CANARÍA MARIÑO

Todos los derechos reservados conforme a la ley. Se permite la reproducción citando fuente. El pensamiento que se expresa en esta obra, es exclusiva responsabilidad de los autores y no compromete la ideología de la Universidad Santo Tomás.



Ediciones Usta

Universidad Santo Tomás

2025

Ediciones Usta Tunja

Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro por cualquier proceso reprográfico o fónico, especialmente por fotocopia, microfilme, offset o mimeógrafo.

Ley 23 de 1982.



Tecnología y Bioeconomía

Lina Patricia Vega Garzón
Kellys Nallith Salcedo Hurtado
Laura Trujillo-Vargas
Carolina García Ávila
Sandra Consuelo Díaz
Elisa María Avellaneda Díaz

AUTORAS



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732

Lina Patricia Vega Garzón



Ingeniera Química de la Universidad Nacional de Colombia, Magister en economía del medio ambiente y los recursos naturales de la Universidad de los Andes – University of Maryland, y Doctora en ingeniería ambiental de la Universidad de Antioquia (Colombia). Se ha desempeñado en el área de docencia en la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja del 2019 al 2024, y actualmente es docente de la Escuela ambiental de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia e investigadora del grupo GIGA. Sus investigaciones abordan los temas de Procesos de Oxidación Avanzada para remoción de contaminantes emergentes en agua, biorremediación de aguas contaminadas con metales pesados, biorrefinerías y bioeconomía.

<https://orcid.org/0000-0002-5184-5383>

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57200393009>

Kellys Nallith Salcedo Hurtado



Es Ingeniera Ambiental con una Maestría en Agroforestería para el Desarrollo Sostenible. Doctora en Ingeniería Ambiental, Docente investigadora de tiempo completo del Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria desde 2018, adscrita a la facultad de ingeniería. Candidata a Doctora en Ingeniería ambiental, con área de concentración en cambio climático y estudio de ecosistemas acuáticos. Coordina el área de procesos biogeoquímicos del programa de ingeniería ambiental y se desempeña como consultora en el ámbito ambiental para el sector de propiedad horizontal e institucional. Ha desarrollado investigación sobre inventarios de huella de carbono para el sector portuario en Colombia, implementación de SGA, evaluación de GEI en ecosistemas acuáticos y gestión del riesgo.

*Orcid: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0001-8968-045X>CVLAC:
<https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/EnRecursoHumano/inicio.do>*

Laura Trujillo Vargas



Es Ingeniera Agroindustrial con Maestría en Biotecnología y Doctorado en Ingeniería, Especializada en el desarrollo de nuevos materiales. Su formación académica y profesional, obtenida en la Universidad Pontificia Bolivariana, le ha permitido adquirir conocimientos profundos en biotecnología ambiental y buenas prácticas agrícolas. A lo largo de su carrera, ha liderado proyectos de investigación interdisciplinarios, desarrollando soluciones innovadoras que integran biotecnología y sostenibilidad.

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9998-5916>

CVLAC: https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001428243

Carolina García Ávila



Bacterióloga, Especialista y Magister en biotecnología. Integrante del grupo de investigación en temas agroambientales (*INTEGRA*) en la línea de agroecología y biotecnología. Docente investigador y coordinadora del programa de Ingeniería Ambiental del Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria, Medellín (Colombia). Ha contribuido al desarrollo y producción de bioinsumos con aplicaciones industriales y ambientales, utilizando microorganismos como agentes bioactivos para promover prácticas agrícolas sostenibles. Además, ha establecido sistemas de control de calidad para garantizar la eficacia y seguridad de los bioinsumos destinados al uso agrícola, centrándose en comprender los microorganismos del suelo y los mecanismos de comunicación entre hongos y plantas.

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-2828-744X>CVLAC: https://scientificiencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001367357

Sandra Consuelo Díaz



Ingeniera metalúrgica Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Magister en metalurgia y ciencia de los materiales, Doctora en Ingeniería, ciencia y tecnología de los materiales. Docente de las facultades de Ingeniería ambiental y civil. Pertenece al grupo de investigación GICAN con las líneas de investigación nuevos materiales de construcción, energías renovables, economía circular y metalurgia extractiva. Directora de varios proyectos de investigación, tesis de pregrado y posgrado.

<https://orcid.org/0000-0002-8114-6655>

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=792771>

Elisa María Avellaneda Díaz



Ingeniera Civil e Ingeniera Ambiental de la Universidad Santo Tomás Tunja, especialista en Gestión Territorial y Avalúos de Universidad Santo Tomás Bogotá, y Magister en Manejo y Sostenibilidad Ambiental de la Universidad Santo Tomás Tunja. Docente de la Universidad Santo Tomás desde 2022-2, áreas de investigación sobre tratamiento de aguas y ordenamiento territorial. Experiencia profesional en la docencia, consultoría ambiental e interventoría de proyectos de construcción.

<https://orcid.org/0000-0002-0636-7116>

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001779792

Agradecimientos

Al Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria,
por la financiación del proyecto: Prototipo para el
monitoreo de aguas lluvias en el municipio de Medellín,
de la convocatoria séptima versión de la Dirección de
Investigación, al igual que a la Facultad de Ingeniería.

Los autores agradecen al grupo de investigación GDCON
de la Universidad de Antioquia por el apoyo brindado para
el desarrollo de este proyecto.

CAPÍTULO 1

Biorrefinería de la industria del Cannabis:

Alternativas de uso de los
residuos en productos de alto
valor agregado 17

2 CAPÍTULO

Aprovechamiento de residuos orgánicos para

la elaboración de briquetas
empleando cascarilla de arroz
y desechos de guadañado 35

CAPÍTULO 3

El agua lluvia:

Una propuesta estratégica
de gestión ambiental para el
sector floricultor del oriente
antioqueño en colombia 57

4 CAPÍTULO

Evaluación de la eficiencia de remoción de nitrógeno

97

Para desnitrificación
usando metano como
fuente de carbono

5 CAPÍTULO

Uso de la Microalga *Chlorella Vulgaris*

Para la degradación de
contaminantes persistentes 113
en medios acuáticos

6 CAPÍTULO

Diseño y evaluación de un Biofiltro

133

Para el tratamiento de aguas
grises domésticas en la
vereda teguaneque, turmequé
(boyacá)



1

Capítulo

Biorrefinería de la industria del cannabis: alternativas de uso de los residuos en productos de alto 'valor agregado' (VA)

**Lina Patricia Vega Garzón^{a,b},
John Alexander Medina Rincón^c**

^a Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Grupo de investigación GIGA, Tunja, Colombia

^b Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería
Ambiental. Grupo de investigación GICAN

^c Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería
Ambiental. Semillero Calidad y Tecnologías ambientales.
Tunja, Colombia

Resumen

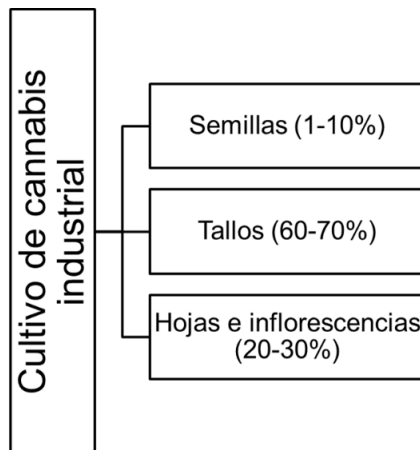
En el mundo, el cannabis tiene un marco regulatorio desarrollado alrededor de su uso medicinal, pero menos para el uso recreativo. La producción hacia el uso medicinal se concentra principalmente en el cultivo y la extracción de cannabinoides. Para la obtención de cannabinoides como el *cannabidiol* (*CBD*), ampliamente utilizado en la industria médica medicinal, se utilizan únicamente las brácteas de las inflorescencias, mientras que el resto de la planta es, por lo general desechado. Ante este hecho, paulatinamente la investigación ha llevado al descubrimiento de nuevos usos para estos subproductos. Compuestos de interés medicinal y terapéutico como otros cannabinoides distintos del *CBD*, o terpenoides son extraídos mediante el uso de fluidos supercríticos. De la misma forma, las semillas son utilizadas en la producción de alimentos y bebidas con características nutraceuticas. Del mismo modo, de los tallos se producen fibras para la producción de textiles, o para la mezcla con otros materiales y su uso en insumos para la construcción y aislantes térmicos entre otros. Así mismo, una aplicación viable es la de usar la biomasa para generar energía, como el biogás y el bioetanol. Este capítulo analiza estas diversas aplicaciones y los avances en la investigación para su producción, teniendo en cuenta que esta industria está en crecimiento exponencial y que las posibilidades de biorrefinería del cannabis son amplias y muy interesantes para la generación de valor agregado y sostenibilidad a esta industria.

Introducción

En los últimos años el cultivo de cannabis medicinal ha tenido un crecimiento constante en la producción, siendo ha sido uno de los sectores productivos con mayor crecimiento, generando empleo y desarrollo económico en los países y regiones donde se produce (Pérez & Benítez, 2023). El mercado del cannabis crece rápidamente. Por ejemplo, en el 2022 en Estados Unidos, el mercado del cannabis su valor alcanzó los 29 billones de dólares estadounidenses y llegó a los 34 billones en 2023 (Kveen, 2023). Sin embargo, la distribución de la producción de cannabis y sus derivados es muy desigual en distintas partes del mundo debido principalmente a las dificultades en su regulación en algunos de ellos (Escobar, 2023). La industria médica del cannabis genera una cantidad considerable de residuos, los cuales tienen como principal uso el compostaje con muchas posibilidades de uso en productos innovadores debido a las características especiales nutraceuticas de los mismos (Kumar Sanjeev, 2019).

19

Ilustración 1. Composición de los productos y subproductos del cultivo de cannabis industrial



Fuente: Propia.

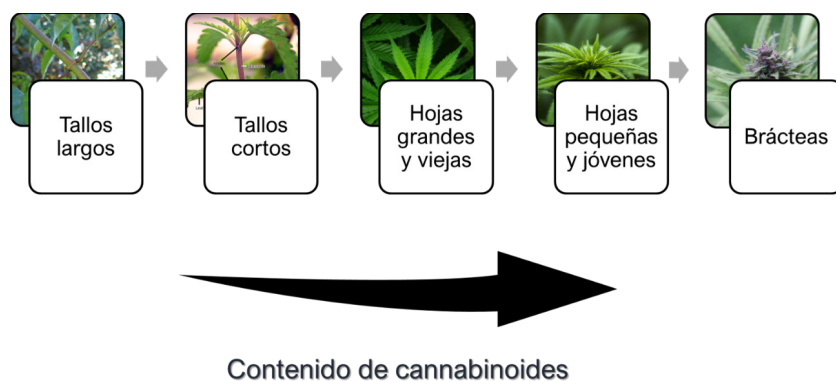
Las distintas partes de la planta de la especie *Cannabis sativa* poseen propiedades especiales que permiten entre otros la producción de aceites esenciales, cannabinoides, terpenoides, y otros derivados, además de usos relacionados con el contenido de fibra, celulosa, y lignina. Cerca de unos 25.000 productos han sido identificados que pueden extraerse de este cultivo al que se le ha denominado polivalente por esta razón. Pocos estudios han abordado de forma integral las diferentes opciones de uso y valorización de estos residuos y los análisis necesarios para la selección de alternativas abordando diversos aspectos que pueden influir en la selección de las distintas tecnologías disponibles para su valorización en la actualidad (Kumar *et al.*, 2017; Setti *et al.*, 2020)

Extracción de Cannabinoides

La composición química de los cannabinoides hace parte de los compuestos orgánicos conocidos como terpenofenoles, poseen estructura carboxílica, la cual se une a una cadena de átomos que permite crear una estructura de *cannabinoides*, principalmente elaborada por ciclohexano, un ciclo alcano disolvente con propiedades apolares, benceno un hidrocarburo aromático y por último oxano, caracterizado por contener en su estructura un átomo de oxígeno (Grotenhermen, 2006). En la planta de *cannabis* ha sido posible aislar alrededor de 120 cannabinoides, cada uno con estructuras y propiedades diferentes. Los cannabinoides presentes en la *Cannabis sativa*, incluyen entre otros al Tetrahidrocannabinol (Δ^9 -THC o THC), (CBD), cannabinol (CBN), cannabigerol (CBG), cannabicromeno (CBC), cannabinol (CBN), y Tetrahydrocannabivarin (THCV). El THC es el compuesto más psicoactivo de la planta, produciendo alteraciones en el sistema nervioso, simulando un estado de relajación y tranquilidad, así como aumentando la producción de dopamina que altera el sistema nervioso central. Por su parte, el CBD o cannabidiol es el cannabinoide más importante en la industria farmacéutica. Debido a su composición química se han elaborado una cantidad considerable de productos a base de cannabis con altos contenidos en CBD (Atance *et al.*, 2021).

La principal característica de la especie *cannabis sativa*, utilizada en las aplicaciones medicinales, es su baja concentración de THC con respecto a los otros cannabinoides, en especial el CBD, principal componente de las recetas utilizadas para compuestos medicinales por sus propiedades anti ansiedad, anti depresión y antipsicóticas. Las especies de *Cannabis sativa* cultivadas para fibra y para semilla tienen altas concentraciones de CBD y bajas de THC. Se considera cannabis de uso industrial a aquella cuya concentración de THC en cualquiera de sus partes no supera el 0,3%. Las empresas productoras han desarrollado cepas con concentraciones más altas de uno u otro cannabinoide para el logro de los objetivos deseados. De la misma forma condiciones como la humedad, temperatura, calidad de la luz y cantidad de nutrientes influyen en la composición de los cannabinoides. Así las cosas, esta concentración de cannabinoides aumenta en la época de floración y aumenta en las diferentes partes de la planta en el siguiente orden: tallos largos, tallos cortos, hojas grandes y viejas, hojas pequeñas y jóvenes, y brácteas que cubren las flores (Francis, 2017).

Ilustración 2. Contenido de cannabinoides en las distintas partes de la planta Cannabis sativa

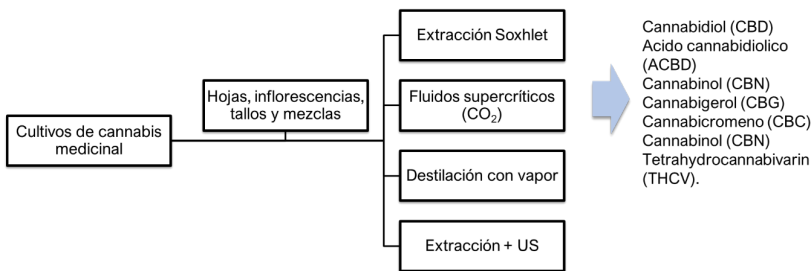


Fuente: propia.

Las técnicas de extracción actuales se concentran en las brácteas presentes en las inflorescencias de plantas no fertilizadas, por medio del método Soxhlet o del uso de fluidos supercríticos como el CO₂; y de dichas técnicas combinadas con el ultrasonido de baja frecuencia que rompe las paredes moleculares celulares permitiendo la liberación

de los compuestos importantes. Recientemente se han estudiado métodos de valorización para hojas, tallos y mezclas de todos los residuos encontrando que la destilación con vapor genera mejora en el perfil de cannabinoides extraídos, debido a la descarboxilación de los *cannabinoides*, y generando un aceite esencial rico en terpenos y otros compuestos de interés (Zheljazkov & Maggi, 2021a)

Ilustración 3. Procesos de extracción de cannabinoides

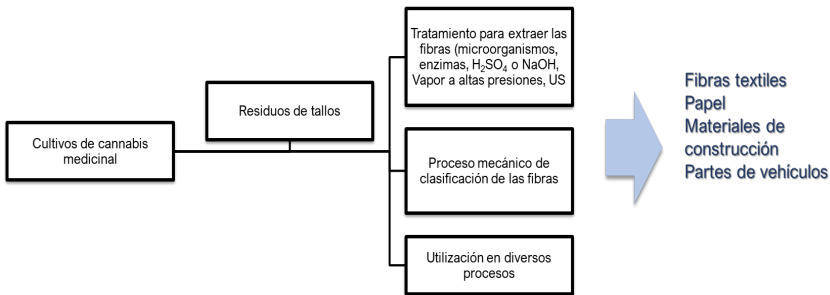


Fuente: Propia.

Producción de Fibras

El mercado mundial de fibras está dominado por las sintéticas pero las fibras de origen natural como el algodón, lana y las fibras de otros vegetales como es el caso de las procedentes del *Cannabis sativa* son aproximadamente el 40% de este mercado. Estas fibras provienen de los frutos, flores, hojas, pero especialmente de los tallos de las plantas, y su cantidad y propiedades dependen de la especie, condiciones climáticas, tiempos de cosecha, entre otras (Francis, 2017). Actualmente, China es el principal productor de fibra de cannabis, la cual es utilizada para hacer textiles, cuerdas, y papel. Estas fibras se han reportado que tienen diferentes contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, son biodegradables, de bajo peso, y producidas de forma sostenible. Su resistencia es útil para la fabricación de materiales compuestos, con buenas propiedades, similares a las de la fibra de vidrio, con la desventaja de que tiene gran variabilidad en ellas.

Ilustración 4. Procesos de producción de fibras



Fuente: Propia.

23

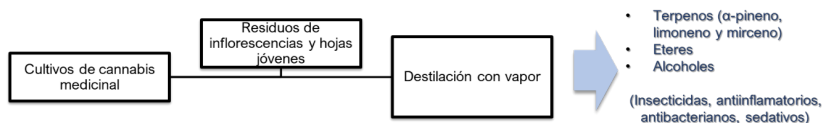
Su extracción se basa en un proceso de remoción del material que une las fibras mediante exposición de los tallos directamente a microorganismos, sumergiendo los tallos en agua, de forma química mediante el uso de ácido sulfúrico (H_2SO_4), hidróxido de sodio (NaOH), o con vapor a altas presiones, con variaciones en las que se utiliza ultrasonido y enzimas para optimizar los procesos. Luego, mediante un proceso mecánico se retiran las fibras largas y se clasifican según sus características dependiendo del uso que se les va a dar (Yazici, 2023). Las fibras de cannabis se utilizan principalmente para la fabricación de textiles, ropa y papel, con la desventaja de que estos productos son duran menos que los hechos de fibras de algodón o sintéticas. Otros usos incluyen los aditivos agrícolas biodegradables; cuerdas; productos moldeados con o sin un material aglutinante como partes de vehículos; y bloques y materiales para la construcción donde tienen propiedades de aislamiento del calor y el ruido y la capacidad de sismo resistencia (Pastrana, 2020)

Producción de Aceites Esenciales

El aceite esencial procedente del cannabis se diferencia del aceite de semilla, en que la mayoría de sus componentes son volátiles, responsables de los aromas, son utilizados en cosmética, alimentos y farmacéuticos. Son mezclas complejas principalmente de terpenos, y de otros compuestos orgánicos oxigenados como alcoholes, éteres,

fenoles y otros. En el cannabis el aceite esencial está compuesto principalmente de 140 tipos distintos de terpenoides, siendo los más comunes el α -pineno y el limoneno. El mirceno es el de mayor interés y se utiliza en la industria de los perfumes. Los aceites esenciales se extraen de las inflorescencias y hojas jóvenes y su composición varía de forma considerable entre las diferentes cepas y cultivos. Algunos tienen propiedades sedantes, insecticidas, antiinflamatorias y antidepresivas. La destilación mediante vapor genera hasta un 5% de aceite dependiendo de las condiciones de la materia prima (Zheljazkov & Maggi, 2021b). Además, se ha demostrado que la prevención de la polinización en invernaderos genera un mayor rendimiento de aceite esencial. Su valor comercial es limitado, y los rendimientos son bajos (aproximadamente 10 litros por hectárea), generando precios altos, por lo que se considera que su potencial está solo en el mercado de la aromaterapia.

Ilustración 5. Procesos de producción de aceites esenciales

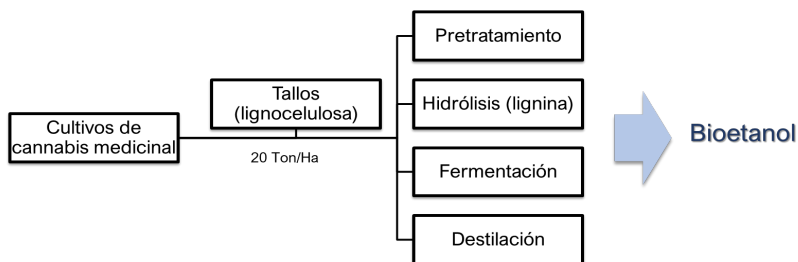


Fuente: Propia.

Producción de Energía

La posibilidad de utilizar la biomasa lignocelulósica que queda como subproducto de la industria del cannabis medicinal presenta una oportunidad interesante en relación con otros cultivos que generan carbohidratos dado su bajo impacto ambiental y a la baja competencia de cultivo como alimento. Sin embargo, la producción de material seco por Ha (20 t /Ha) es bajo comparado con otros cultivos utilizados para tal fin como la caña de azúcar o el maíz. Se puede producir alcohol basado en la celulosa del cannabis, pero su factibilidad depende de su competencia con otros cultivos y fuentes de energía.

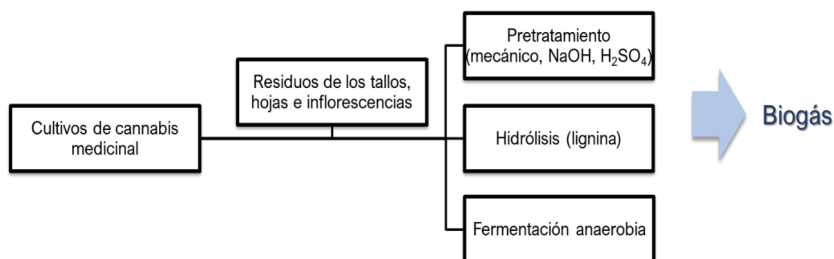
Ilustración 6. Procesos de producción de bioetanol a partir de desechos de Cannabis sativa



Fuente: Propia.

La producción de biogás, por su parte, ha demostrado tener baja factibilidad a excepción de su utilización en procesos cercanos al lugar de cultivo (Taylor Francis, 2017). El potencial de biometano de las distintas partes de la planta de cannabis sativa mediante estudios hechos ensayos en lote (batch) bajo condiciones anaeróbicas es de $422 \pm 20 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g VS}^{-1}$ para los tallos; $280 \pm 4 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g VS}^{-1}$ para los residuos de tallos con tratamiento previo mecánico; de $239 \pm 10 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g VS}^{-1}$ para los residuos de tallos con pretratamiento con NaOH; y de $118 \pm 8 \text{ mL CH}_4 \cdot \text{g VS}^{-1}$ para las hojas e inflorescencias con pretratamiento con NaOH (Matassa et al., 2020). Es así como esta biomasa recibe un pretratamiento mecánico, y una posterior hidrólisis ácida o básica para permitir su fermentación anaerobia.

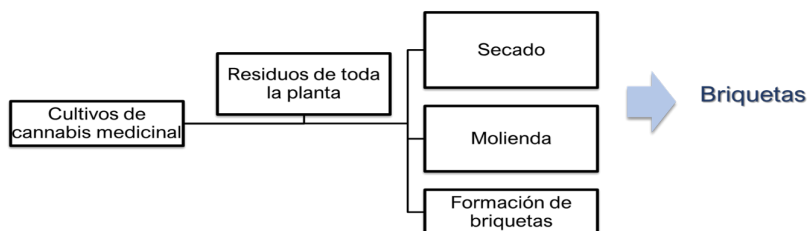
Ilustración 7. Proceso de producción de biogás a partir de desechos de Cannabis sativa



Fuente: Propia.

La utilización de los desechos del cannabis en la producción de briquetas se asemeja a la de la madera, con alta capacidad calorífica y bajos niveles de corrosión. Sin embargo, su factibilidad económica es baja. El proceso, como se muestra en la figura 6, consiste en llevar a cabo un secado de los residuos, molerlos para formar a partir de este material las briquetas.

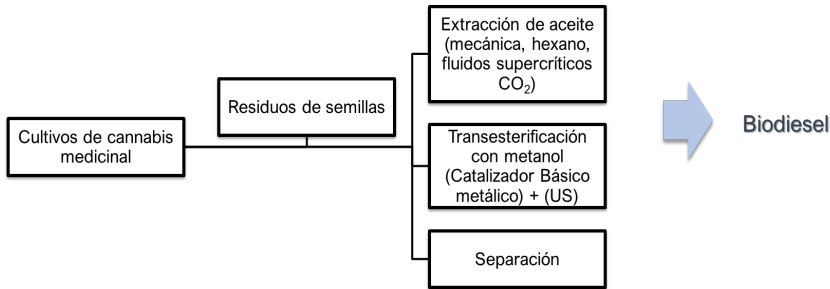
Ilustración 8. Producción de briquetas a partir de desechos de Cannabis sativa



Fuente: Propia.

Por su parte, el aceite de la semilla que tiene una baja volatilidad, compuesto en un 75% partes de ácidos grasos insaturados puede convertirse en biodiesel mediante transesterificación con metanol, teniendo características similares o superiores que otros producidos con aceites como el de palma. Su extracción puede realizarse en frío mediante prensado, con lo que se logra extraer hasta un 90%, pero también puede extraerse de forma más económica con solventes como el hexano o fluidos supercríticos como el CO₂ (Z. Yilbaşı M. K., 2022). Sin embargo, este proceso tiene una baja factibilidad económica, por lo que se están realizando investigaciones con el fin de optimizar las condiciones de transesterificación de forma que puedan lograrse un mayor rendimiento y rentabilidad de este proceso (Yilbaşı et al., 2021). Una de ellas es la del uso de reactores con cavitación con los cuales se obtiene una eficiencia de reacción de hasta el 97%, pero sólo se ha investigado en escala de laboratorio (Khan et al., 2020).

Ilustración 9. Procesos de producción de biodiesel
a partir de desechos de *Cannabis sativa*



Fuente: Propia.

Producción de alimentos y bebidas

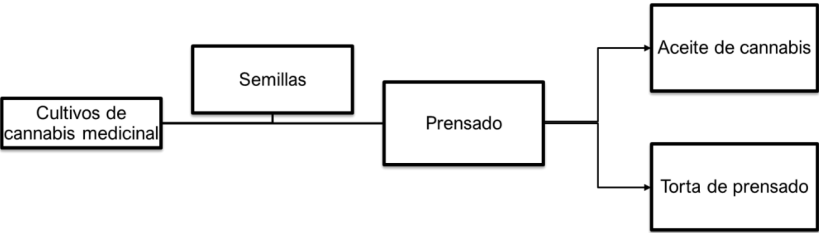
La planta de *cannabis* tiene características nutricionales importantes en cada uno de sus componentes, pero la mayoría de las investigaciones concluyen que son las semillas las que tienen un mayor valor en su uso como aditivos y como alimento en sí (Xu *et al.*, 2022). El aceite de semilla de cannabis es de gran utilidad para la elaboración de alimentos por su alto contenido de ácidos grasos insaturados y su fibra dietaria (aprox 25%), además de tener compuestos como terpenos y cannabinoides que son de valor nutracéutico. Entre los ácidos grasos poliinsaturados más importantes están el Omega 6 (ácido linoleico), y el Omega 3 (ácido α -linolénico) que son importantes para la salud cardiovascular. El contenido de tocoferoles (vitamina E) es importante y mayor que en otras semillas (aprox 0.1%), y es un antioxidante indispensable en la nutrición humana. El contenido de proteína no es tan importante como en otras semillas (hasta 25-30%), con un bajo contenido de lisina, pero un importante contenido de arginina y de edestina, la cual es altamente digerible. Igualmente, los fenoles, polifenoles y flavonoides, tienen propiedades antiinflamatorias y de cardio protección. Otros componentes importantes son los carbohidratos, minerales y la fibra dietaria. A pesar de su valor nutricional y de tener un sabor bueno y alta estabilidad antes

de quitar la corteza, las semillas no son comercializados ampliamente como alimento por la posibilidad de que sean utilizadas para producir plantas de cannabis, sin embargo, han sido comercializadas en EE.UU. y Alemania.

El aceite no es utilizado para cocinar por su susceptibilidad a la oxidación, superior a la de otros aceites. La torta que queda tras la extracción del aceite de semillas de cannabis mediante prensado en frío es frecuentemente utilizada para alimentar animales, y también para producir harina para alimentación humana. El aceite y la semilla han sido incluidos en diversos productos como panes, tortas, chocolates, quesos, bebidas, cereales, etc., para mercados especializados debido a sus características nutricionales y su buen sabor. En la actualidad se estudian recomendaciones para hacer el CBD presente en dichos alimentos más soluble y biodisponible. Igualmente, se comercializan brotes de cannabis en aquellos países donde la regulación lo permite, teniendo en cuenta que tienen un bajo contenido de THC. También se producen bebidas como remplazo de la leche con probióticos, alto contenido de fibra y de ácidos grasos poliinsaturados, además de terpenoides y Fito cannabinoides que actúan como antioxidantes, antiinflamatorios, entre otras propiedades especiales. (Taylor Francis, 2017).

Se considera que esta industria de alimentos del cannabis requiere una mayor diferenciación entre el cannabis industrial y el medicinal que puede contener THC, debido a la complejidad de la regulación. Así mismo requiere una estandarización en los procesos de producción y una clara identificación de los compuestos bioactivos, así como un estricto control de calidad en relación con su composición de *THC* y *CBD*, la cual puede variar entre lotes de producción. Al ser considerado un ingrediente funcional requiere de estudios clínicos y otros que verifiquen sus efectos (Vasantha Rupasinghe *et al.*, 2020).

Ilustración 10. Producción de alimentos a partir de los desechos de Cannabis sativa



Fuente: Propia.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

30

- Acevedo, J. S. H., & Jiménez, E. E. C. (2016). Evaluación de la huella hídrica para la producción de miniclaveles Pigeon en flores de Serrezuela S.A. Universidad de La Salle.
- Arboleda Montaña, N. (2016). Diagnóstico del sistema de aprovechamiento del agua lluvia en el consejo comunitario de la comunidad negra de Los Lagos, Buenaventura. *Revista Luna Azul*, 43, 28. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.3>
- Atance, R., Ruiz, F., Correspondencia, E., & Ramos Atance, J. (2021). Uso de los cannabinoides a través de la historia. *Revista*, 12(2).
- Barahoei, M., Sadegh Hatamipour, M., & Afsharzadeh, S. (2021). Direct brackish water desalination using *Chlorella vulgaris* microalgae. *Desalination*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.115623>
- Barros, J. (2021). Práctica de identificación y conteo de microalgas. Universidad del Magdalena – Facultad de Ingeniería Agronómica. <https://bloque10.unimagdalena.edu.co/identificacion-y-conteo-de-microalgas/>
- Beltrán, J., Guajardo, C., Barceló, I., & López, U. (2017). Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO₂. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(3), 353–364. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-19572017000300001
- Castelblanco, L. G. (2018). Impacto del cambio climático en la relación oferta–demanda del recurso hídrico en el páramo de Pisba. Universidad Nacional de Colombia.
- Castillo, B., Ruiz, J., Manrique, M., & Pozo, C. (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú). *Espacios*, 41(10), 11. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n10/a20v41n10p11.pdf>

- Chávez-Jiménez, A., & González-Zeas, D. (2015). El impacto de los caudales medioambientales en la satisfacción de la demanda de agua bajo escenarios de cambio climático. *RIBAGUA - Revista Iberoamericana del Agua*, 2(1), 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.001>
- Covarrubias, S., García, J., & Peña, J. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25(3), 40–45. <https://doi.org/10.15174/au.2015.907>
- De Luis Calabuig, E. (2015). A fondo: Agua. *Ambiociencias - Revista de Divulgación Científica*, 13, 5–23.
- Forero, P., & Ruiz, E. (s. f.). Fundamento teórico sobre tratamiento de aguas residuales por fitorremediación. Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13266/ARTICULO%20PROYECTO%20DE%20GRADO%20.pdf>
- Franco, M., Rodríguez, M., Moreno, U., & Martínez, A. (2017). Tolerance and nutrients consumption of *Chlorella vulgaris* growing in mineral medium and real wastewater under laboratory conditions. *Open Agriculture*, 2(1), 394–400. <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0042>
- García, M., & Peralta, M. (2008). Cometabolism in the biodegradation of hydrocarbons. *Mexican Journal of Chemical Engineering*, 7(1). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382008000100001&script=sci_abstract
- González, A. (2015, octubre). ¿Qué son las microalgas? Interés y uso. Grupo Cooperativo Cajamar. <https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>
- Grotenhermen, F. (2006). Los cannabinoides y el sistema endocannabinoide. *Cannabinoids*, 1(1). www.cannabis-med.org
- Guerrero, A. (2018). Manejo de plaguicidas en cultivos de *Zea mays* L. “maíz” (Poaceae), *Brassica cretica* Lam. “brócoli”

- (Brassicaceae), *Apium graveolens* L. “apio”, *Coriandrum sativum* L. “cilantro” (Apiaceae), *Allium fistulosum* L. “cebolla china” (Amaryllidaceae) en la campiña de Moche, Trujillo, Perú. *Arnaldoa*, 25(1), 239–253. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2413-32992018000100010
- Khan, I. A., Prasad, N., Pal, A., & Yadav, A. K. (2020). Efficient production of biodiesel from *Cannabis sativa* oil using intensified transesterification (hydrodynamic cavitation) method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(20), 2461–2470. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607946>
- Kumar, S., Singh, R., Kumar, V., Rani, A., & Jain, R. (2017). *Cannabis sativa*: A plant suitable for phytoremediation and bioenergy production. In *Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants* (pp. 269–285). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3084-0_10
- Matassa, S., Esposito, G., Pirozzi, F., & Papirio, S. (2020). Exploring the biomethane potential of different industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) biomass residues. *Energies*, 13(13), 3361. <https://doi.org/10.3390/en13133361>
- Pastrana, J. (2020). Diseño de una planta para la fabricación de derivados de *Cannabis* en el mercado emergente colombiano y evaluación de eficiencia del layout propuesto. [Tesis de grado, Universidad Nacional de Colombia].
- Pérez, J. A., & Benítez, R. (2023). Residuos de *Cannabis sativa* medicinal como materia prima para una bioeconomía en Colombia. En *Reflexiones de los proyectos de jóvenes innovadores del departamento del Cauca* (p. 175).
- Setti, L., Samaei, S. P., Maggiore, I., Nissen, L., Gianotti, A., & Babini, E. (2020). Comparing the effectiveness of three different biorefinery processes at recovering bioactive products from hemp (*Cannabis sativa* L.) byproduct. *Food and Bioprocess Technology*, 13(12), 2156–2171. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02550-6>

- Small, E. (2017). *Cannabis: A complete guide*. CRC Press.
- Vasantha Rupasinghe, H. P., Davis, A., Kumar, S. K., Murray, B., & Zheljazkov, V. D. (2020). Industrial hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) as an emerging source for value-added functional food ingredients and nutraceuticals. *Molecules*, 25(18), 4310. <https://doi.org/10.3390/molecules25184078>
- Xu, J., Bai, M., Song, H., Yang, L., Zhu, D., & Liu, H. (2022). Hemp (*Cannabis sativa* subsp. *sativa*) chemical composition and the application of hempseeds in food formulations. *Plant Foods for Human Nutrition*, 77(4), 504–513. <https://doi.org/10.1007/s11130-022-01013-x>
- Yazici, L. (2023). Optimizing plant density for fiber and seed production in industrial hemp (*Cannabis sativa* L.). *Journal of King Saud University – Science*, 35(1), 102419. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.102419>
- Yilbaşı, Z., Yesilyurt, M. K., & Arslan, M. (2021). The production of methyl ester from industrial grade hemp (*Cannabis sativa* L.) seed oil: A perspective of Turkey — the optimization study using the Taguchi method. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01751-z>
- Zheljazkov, V. D., & Maggi, F. (2021). Valorization of CBD-hemp through distillation to provide essential oil and improved cannabinoids profile. *Scientific Reports*, 11(1), 99335. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99335-4>



Capítulo 2

Aprovechamiento de residuos orgánicos para la elaboración de briquetas, empleando cascarilla de arroz y desechos de guadañado

**David Santiago Camargo Mogollón^a,
Julieth Tatiana Cárdenas Rivera^a,
Margeth Juliana García Niño^a,
Laura Vanessa Samacá Ruiz^a,
Sandra C. Díaz Bello^a**

^a Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería
Ambiental. Grupo de investigación GICAN

Resumen

El uso de residuos agrícolas y orgánicos en la producción de briquetas se ha consolidado como una destacada alternativa que permite reducir la dependencia de los combustibles fósiles y contribuir al desarrollo sostenible de las comunidades a nivel global. En este sentido, el presente proyecto investigativo tuvo como objetivo aprovechar los residuos orgánicos para la elaboración de briquetas empleando cascarilla de arroz y desechos de guadañado. El desarrollo metodológico, comprendió una revisión sistemática de la literatura científica y técnica y la elaboración de briquetas de forma manual y mediante una prensa hidroneumática; donde finalmente, se compararon variables como humedad, tamaño de partícula, color de la llama, poder calorífico y tiempo de combustión para determinar el rendimiento de cada briqueta. Los resultados indicaron que las briquetas elaboradas manualmente y con una prensa hidroneumática a 0,2 Ton presentan las características óptimas, destacando su eficiencia en comparación con aquellas sometidas a presiones mayores. Se concluye que la porción de mezcla, el tipo de aglutinante y el tamaño de partículas son parámetros que influyen en las características físicas y mecánicas de las briquetas producidas

Introducción

Actualmente, el mundo depende de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas natural para satisfacer la mayoría de sus necesidades energéticas; estos recursos representan aún más del 80% de la producción de energía global. Sin embargo, la emergencia climática vinculada directamente con el uso masivo de estos combustibles, y la creciente amenaza que plantean para la salud pública y la biodiversidad, se han convertido en factores determinantes que han impulsado a las naciones a tomar medidas concretas en aras de proteger el ambiente y salvaguardar el bienestar de las generaciones presentes y futuras (Cosa, 2023).

En respuesta a esta urgente necesidad de cambio, ha surgido un movimiento global hacia las energías renovables y la transición energética. Esta transición representa un cambio de paradigma esencial en la forma en que abordamos la producción y el consumo de energía, debido a que su objetivo principal es la descarbonización y la reducción significativa de las emisiones contaminantes. Además de abordar los desafíos ambientales, la transición hacia energías más limpias y sostenibles también fomenta la innovación tecnológica y promueve la creación de empleo en una amplia gama de sectores, contribuyendo al desarrollo equitativo y sostenible de las comunidades a nivel global (Matteo, 2022). Para lograr estos cambios, es imprescindible reconocer que la adopción de todas las opciones de energía y tecnologías disponibles con emisiones nulas o bajas en carbono es crucial; estas opciones incluyen el uso de fuentes de energía renovable, la electrificación, la bioenergía y la tecnología del hidrógeno (Terlizzi, Gama, & Quintero, 2021).

En este contexto, la utilización de residuos agrícolas y orgánicos para la producción de briquetas ha emergido como una alternativa viable y

respetuosa con el medio ambiente, así lo constata Okwu *et al.* (2023) al afirmar que los residuos agrícolas se utilizan cada vez más como combustible doméstico para sustituir a los combustibles fósiles, reducir la contaminación ambiental y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. De igual modo, Ferronato *et al.* (2023), en su investigación acerca del ciclo de vida ambiental de la producción y consumo de briquetas a base de residuos de biomasa y cartón en zonas andinas, destaca que el uso de briquetas puede respaldar la introducción de combustibles alternativos en países en vía de desarrollo, donde los recursos energéticos son escasos.

El estudio de Ibitoye *et al.* (2023) exploró la fabricación de briquetas a partir de mazorca de maíz y cascarilla de arroz con el objetivo de analizar sus propiedades físicas y mecánicas, determinando que la durabilidad de la briqueta es mayor cuando se utilizan tamaños de partícula más finos y que parámetros como la porción de mezcla, el tamaño de partícula y la fuerza de compactación influyen directamente en las características físico-mecánicas de las briquetas.

Por su parte, Celestino *et al.* (2023) se enfocó en la producción de briquetas bio-compuestas a partir de cascarilla de arroz carbonizada y cascarilla de café, empleando tres tipos de aglutinantes: arcilla, goma arábiga y aglutinantes híbridos. Los resultados indicaron que las briquetas elaboradas con goma arábiga poseen valores caloríficos altos. Sin embargo, aquellas en las que se incorporaron aglutinantes híbridos mostraron un rendimiento en función del tiempo de ebullición, mayor velocidad de combustión, mayor resistencia a la compresión y bajo consumo de combustible.

Asimismo, Valiente (2017) centró su estudio en la evaluación de la viabilidad ambiental y económica de la elaboración de briquetas utilizando cascarilla de arroz y almidón de yuca como aglutinante; identificando que la composición óptima para la elaboración de estas briquetas es de 70% de cascarilla y 30% de aglutinante. Al relacionar los beneficios ambientales estimados en el estudio, se determinó que usar briquetas con residuos agroindustriales podría minimizar aproximadamente 10 700 ton/año de CO₂ emitidas por la quema de leña.

Ahora bien, en su estudio del año 2019, Smith et al. (2019) investigaron sobre la viabilidad técnica de la producción de briquetas con residuos de podas urbanas y bagazo de caña de azúcar, para transformar estos desechos en un producto agregado y reducir su disposición inadecuada. Con una caracterización física, química y energética, que incluyó pruebas de expansión, desempeño y resistencia mecánica, se concluyó que ambos residuos poseen un considerable potencial para la producción exitosa de briquetas, resaltando la importancia de aprovechar los residuos orgánicos urbanos para contribuir con la gestión sostenible de estos.

La investigación llevada a cabo en Irán por Mamani *et al.* (2022) aborda la producción de briquetas inflamables a partir de residuos de poda de árboles urbanos y césped, utilizando incienso como aglutinante natural. El enfoque principal del estudio es la optimización de la densidad y fricción de las briquetas, teniendo en cuenta variables como presión, humedad, temperatura, porcentaje de mezcla y aditivos. Los resultados revelaron que un aumento en la humedad disminuye la densidad y fuerza de fricción de las briquetas, recomendando considerar estos parámetros para investigaciones futuras para mejorar su sostenibilidad y eficacia.

Estos estudios ofrecen una perspectiva integral sobre la producción de briquetas y su optimización, resaltando la necesidad de enfoques sostenibles en la gestión de residuos y la transición hacia fuentes de energía más limpias y eficientes; ya que actualmente se observa un mal manejo de los residuos orgánicos, contribuyendo significativamente a la contaminación ambiental y al desaprovechamiento de su potencial como un recurso valioso (Gallipoliti *et al.*, 2011).

En este orden de ideas, generalmente en las zonas rurales, los residuos de guadañado a menudo se queman o vierten en fuentes hídricas debido a la falta de conocimiento y estrategias adecuadas de aprovechamiento. Asimismo, la cascarilla de arroz, un residuo común, se dispone en vertederos a cielo abierto o se quema indiscriminadamente, afectando negativamente al suelo, al paisaje y al aire (Jaider *et al.*, 2009). Además, se desaprovechan nutrientes y materia orgánica, generando pérdidas económicas, ya que estos residuos podrían reintegrarse a la economía

como fertilizantes o, en este caso, utilizados para producir briquetas (Franco Galán & Hernández Velásquez, 2004).

Este proyecto es importante porque se implementa una alternativa ecológica y sostenible para obtener nuevos materiales en la fabricación de briquetas, y busca incentivar a la sociedad para aprovechar estos residuos y utilizarlos como recursos que permitan generar empleo e ingresos económicos en las comunidades. Esto se debe a que representan alternativas menos contaminantes y se encuentran al alcance de todos (Huaman, Ramírez & Surichaqui, 2021). El objetivo del presente proyecto fue aprovechar los residuos orgánicos para la elaboración de briquetas empleando cascarilla de arroz y desechos de guadañado.

Materiales y Métodos

El desarrollo metodológico tuvo un enfoque cualitativo y cuantitativo, ya que se hizo mediante tres fases que permitieron cumplir con el objetivo del proyecto. Luego, se describe cada actividad ejecutada durante el proyecto investigativo.

Fase 1. Recopilación de Información

Para tener una visión clara con relación a la elaboración de briquetas a partir de residuos orgánicos, fue necesario realizar una búsqueda y selección de información confiable con respecto a los procesos de producción y obtención de estas. Lo anterior se llevó a cabo mediante la revisión bibliográfica de la base de datos de la Universidad Santo Tomás Seccional Tunja (*Scopus*, *Science Direct*, *SpringerLink*, entre otras), además, de *Google Académico e Intelligo*, las cuales permitieron desarrollar una comprensión de las prácticas y técnicas actuales en la producción de briquetas. Se consideraron variables como aglutinantes, humedad, tamaño de partícula y el poder calorífico. Este conocimiento fue esencial para tomar decisiones frente a la elaboración de briquetas, para promover su uso como fuente de energía sostenible.

Fase 2. Desarrollo del Proceso de Producción de Briquetas

Considerando la información recogida en la Fase 1 de la investigación, se identificaron dos tipos de residuos efectivos para fabricar las briquetas, la cascarilla de arroz y el desecho de guadañado. El proceso de fabricación se detalla a continuación:

Elaboración Manual

- Briquetas de Residuo de Guadañado

Para la preparación de la mezcla de estas briquetas se utilizó 15 g de residuos de guadañado dejándolo secar por 20 días en un lugar abierto. Una vez seco, se elaboraron briquetas de diferente tamaño de partícula, unas se hicieron con el tamaño original del residuo, mientras que las otras se trituraron para obtener un tamaño de partícula de 1 a 3 mm.

Luego, se realizó la preparación del aglutinante, el cual cumple con la función de mantener unidas las partículas del material durante el proceso de elaboración, esto se hizo utilizando residuo de papel, periódico y cartón, combinado con agua.

Ilustración 11. Mezclado de residuo de guadañado con el aglutinante



Fuente: Propia.

Una vez que se completaron los pasos anteriores, se mezcló el aglutinante con el residuo de guadañado triturado y con el no triturado por separado, hasta obtener una mezcla uniforme. Para el moldeado, se cortó la cuarta parte superior de una botella plástica de 2 litros con un bisturí, y en la parte inferior se le realizaron orificios con el propósito de drenar el agua que se desprende, al ejercer una fuerza. Es importante mencionar que, este molde se utilizó solo para las partículas de tamaño original. Para aquellas que fueron trituradas, se utilizó un vaso plástico desechable de 1.5 oz al cual se le realizaron orificios en la parte inferior. La compactación de la mezcla y el aglutinante se realizó aplicando presión manual, empleando una botella hasta que se drenara el mayor contenido de líquido sobrante. Finalmente, se sacaron las briquetas del molde y se dejaron secar durante 10 días.

Ilustración 12. Compactación manual



Fuente: Propia.

*Ilustración 13. Briquetas con diferente tamaño de partícula.
Fuente: Autores del proyecto*



Fuente: Propia.

- Briquetas de Cascarilla de Arroz

Para esta mezcla se usaron 125 gr de cascarilla de arroz, para el material no triturado y el triturado con un tamaño de partícula de 1 a 3 mm, el aglutinante empleado fue almidón de yuca en 107 g diluidos en 100 ml de agua. Para este proceso se calentó el agua y el almidón de yuca a fuego bajo, para obtener una mezcla homogénea y viscosa, que luego se mezclaron con la cascarilla de arroz.

Ilustración 14. Materia prima original y triturada. Fuente: Autores del proyecto



Fuente: Propia.

Ilustración 15. Almidón de yuca y mezcla final. Fuente: Autores del proyecto



Fuente: Propia.

Enseguida, se procedió a agregar la mezcla triturada y no triturada a los moldes (vaso de plástico desechable de 1.5 oz y botella plástica cortada, respectivamente). El proceso de compactación se realizó aplicando presión manual mediante una botella plástica hasta observar una uniformidad en la briqueta, posteriormente, se sometieron a un proceso de secado a temperatura ambiente durante 8 días.

Ilustración 16. Resultado del molde con tamaño de partícula original y triturada



Fuente: Propia.

Elaboración de Briquetas empleando la Prensa Hidroneumática

Para la fabricación de estas briquetas se utilizó la mezcla triturada antes mencionada, con la diferencia que el proceso de compactación se realizó mediante una prensa hidroneumática a diferentes presiones. finalmente, se retiraron las briquetas del molde, se pesaron y se dejaron secar al aire libre durante 8 días previos a sus análisis

45

Ilustración 17. Prensa hidroneumática y desmolde



Fuente: Propia.

Ilustración 18. Briqueta desmoldada



Fuente: Propia.

David Santiago Camargo Mogollón^o, Julieth Tatiana Cárdenas Rivera^o,
Margeth Juliana García Niño^o, Laura Vanessa Samacá Ruiz^o, Sandra C. Díaz Bello^o

- Briquetas de Cascarilla de Arroz

Para elaborar estas briquetas se necesitó mezclar con la cascarilla de arroz mencionada, pero, en vez de compactarlas manualmente, se empleó una prensa hidroneumática para aplicar diferentes niveles de presión. Tras el proceso, se sacaron las briquetas del molde, se pesaron y se pusieron en un ambiente seco durante 8 días.

46

Fase 3. Comparación del rendimiento de las briquetas

Para esta fase se compararon los dos tipos de briquetas usando diferentes materiales para la fabricación. Además, se tienen en cuenta las variables de estudio, la humedad, el tamaño de partícula, el color de la llama, el poder calorífico y el tiempo de combustión para cada briqueta. A continuación, se menciona el proceso para cada variable:

Tamaño de partícula: Para ambas mezclas de las briquetas se utilizó una trituradora de grano eléctrica de cocina, de manera que las muestras quedaran parcialmente trituradas, con el fin de que el material se compactara mejor con cada aglutinante.

Humedad: se determinó mediante el método del peso, en el que se pesó la muestra de briquetas y se anotó el peso inicial, luego se colocaron a secar en un lugar abierto, durante unos 10 días, y en este tiempo, se volvieron a pesar. Para el cálculo de la humedad se utilizó la siguiente ecuación:

Variables cualitativas para cada método de compactación

$$H = \frac{W_h - W_s}{W_s} \times 100 \quad \text{Ec 1.}$$

H = Humedad (%)

W_h = Peso húmedo (g)

W_s = Peso seco (g)

Poder calorífico: dos briquetas de cada material se sometieron al fuego, de tal manera que se observará el color de la llama, intensidad de llama y tiempo de combustión, comparando los resultados con literatura previamente consultada.

Ilustración 19. Color e intensidad de la llama para los dos tipos de briquetas



Fuente: Propia.

Resultados

Tamaño de partícula

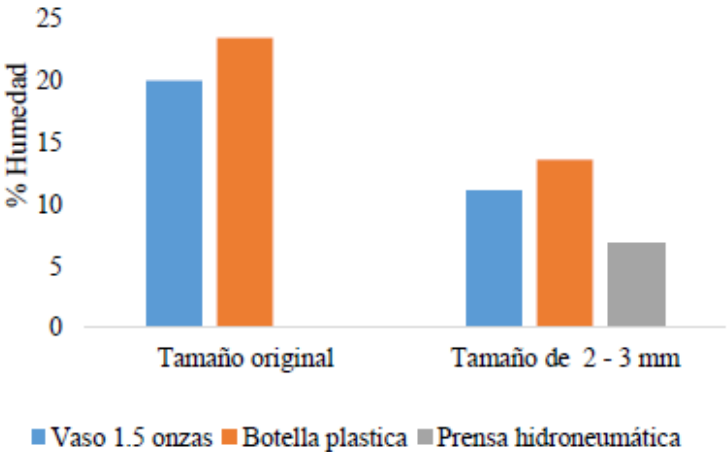
Según la literatura consultada, se determinó que el tamaño de partícula debe ser inferior a 3 mm; tanto para las briquetas elaboradas con cascarilla de arroz, como para aquellas producidas a partir de residuo de guadañado. Esto garantiza que las briquetas tengan mejores características mecánicas, un buen acabado superficial y un mayor aglutinamiento de material.

Tabla 1. Porcentaje de humedad de las briquetas de residuo de guadañado

Residuo de guadañado				
Molde	Vaso 1.5 oz		Botella plástica	Prensa Hidroneumática
Tamaño partícula	Original	2 - 3 mm	Original	2 – 3 mm
Peso inicial (g)	8	9	85	14
Peso final (g)	6	8	68	12
Humedad (%)	33.3333	12.5	25	14.2857

Fuente: Propia.

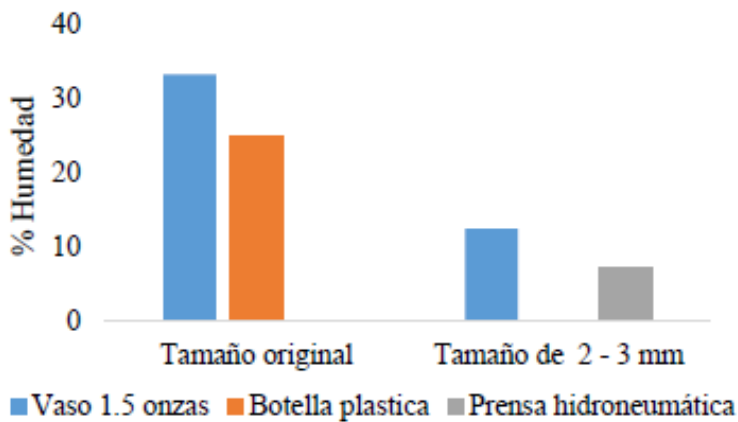
Gráfico 1. Relación del % de humedad según el tamaño de partícula de la



Fuente: Propia.

En la tabla 3 se observa el porcentaje de humedad de las briquetas de los residuos utilizados. Lo anterior evidencia que reduciendo el tamaño de partícula en seco el material alcanza mejores resultados para poderla aglomerar.

Gráfico 2. Relación del % de humedad según el tamaño de partícula del residuo de guadañado



Fuente: Propia.

Color e intensidad de la llama

Tabla 2. Color e intensidad de la llama para los dos tipos de briquetas

Tipo de briqueta	Color	Intensidad
Briqueta de desechos de guadañado	Naranja	Alta
Briqueta de cascarilla de arroz	Azul	Baja

Fuente: Propia.

Poder calorífico

Tabla 3. Características caloríficas de las briquetas

Cascarilla de arroz				
Parámetro	Molde	Vaso 1.5 onzas	Botellas plásticas	Prensa 0.2
Consumo Completo	No	No	No	No
Residuo de guadañado				
Consumo Completo	Si	Si	Si	Si

Fuente: Propia.

Como las briquetas hechas con cascarilla de arroz no generan combustión completa, no se puede calcular su poder calorífico.

Por otra parte, se presentan los resultados de poder calorífico para las briquetas elaboradas con desecho de guadañado. Los resultados se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 4. Poder calorífico briquetas de desecho de guadañado

Parámetro	Briquetas pequeñas	Briquetas grandes
Indicativo	Práctico	Práctico
Peso	8	85
Tiempo de combustión (s)	100	600
Potencia de calentamiento (W)	5.83	1750
Energía liberada Julios	583	1050000
Poder calorífico J /g	72.875	12352.94118

Fuente: Propia.

Tiempo de combustión

Las briquetas elaboradas con cascarilla de arroz mostraron una combustión incompleta, y se identificó que no son eficientes como conductoras de calor, ya que se apagan inmediatamente al retirar la fuente de calor. En contraste, las briquetas fabricadas a partir del desecho de guadañado, compactadas con la prensa hidroneumática y con un grosor de 2 cm, demostraron ser excelentes conductoras de calor al mantener una combustión continua durante 5 minutos. Este resultado sugiere una mayor eficiencia en la liberación y transmisión de energía en comparación con las briquetas de cascarilla de arroz.

Discusión

Los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación indican que las briquetas realizadas manualmente y con una prensa hidroneumática a 0.2 Ton son las óptimas para realizar, debido a que

presentan variables cualitativas más eficientes con respecto a si se ejerce presiones mayores. Asimismo, el tamaño de partícula influye directamente en las propiedades finales de las briquetas; porque las elaboradas con partículas inferiores a 3 mm demostraron compactación y uniformidad, ajustándose con las recomendaciones de la literatura, que sugiere la importancia del control preciso del tamaño de la partícula durante su producción para obtener mejores características finales (Fonseca Cuenca & Tierra Tingo, 2011).

Es fundamental destacar que tanto el tamaño de partícula como el método de compactación de las briquetas tienen un impacto significativo en el contenido de humedad, tal como se observa en la Tabla 2 y Tabla 3; en las cuales es posible evidenciar que las briquetas elaboradas manualmente con partículas de tamaño original en el vaso de 1.5 oz muestran porcentajes de humedad más elevados, llegando aproximadamente al 20% y 33.33%, respectivamente.

En contraste, las briquetas fabricadas con partículas de tamaño inferior a 3 mm presentan porcentajes de humedad más bajos, generalmente por debajo del 15%. Este resultado indica que se debe optimizar tanto el tamaño de partícula como el proceso de compactación si se desea obtener briquetas homogéneas y con mayor rendimiento energético.

Asimismo, se puede afirmar que existe una notable diferencia en el color de la llama entre ambas briquetas. Esto se debe a sus propiedades químicas. En el caso de la briqueta de guadañado, el pasto y el cartón contienen carbón, por lo tanto, al quemarse este carbón es liberado, produciendo una combustión incompleta (Betancur, 2022). Por otro lado, en el caso de la cascarilla de arroz, al tener como aglutinante el almidón de yuca, podría generar una llama azul, indicativo de una combustión eficiente y completa (Viquez, Caydiid & Adhiambo, 2018).

Por último, la briqueta de guadañado grande posee un poder calorífico específico, liberando más energía, 12,350.94 J/g, pero, según la literatura, debe estar entre 15,000 y 18,000 J/g. Por ende, es crucial implementar medidas controladas para garantizar resultados eficientes; esto implica ajustar con precisión la temperatura, asegurar la cantidad adecuada de oxígeno y optimizar la duración de la combustión. Estas

acciones no sólo asegurarán un rendimiento energético eficiente, sino también una gestión consciente y sostenible de los recursos (Lucas & Peso, 2012). Por otra parte, la briqueta de guadañado pequeño libera menos energía, por lo que se recomienda usar un tamaño mayor para lograr una mayor liberación de calor.

Conclusiones

Los resultados de la investigación revelan que las briquetas elaboradas con cascarilla de arroz presentaron limitaciones notables, evidenciadas por una combustión incompleta y una baja eficiencia como conductoras de calor. Por el contrario, las briquetas fabricadas a partir de desechos de guadañado, especialmente aquellas compactadas con la prensa hidroneumática y con un grosor de 1 cm, demostraron ser una opción eficiente y sostenible como fuente de energía calorífica.

Asimismo, la proporción de mezcla, el tamaño de las partículas y la fuerza de compactación tienen un gran impacto en las características físicas y mecánicas finales de las briquetas, resaltando la importancia de considerar cuidadosamente estos aspectos en el proceso de producción para lograr un producto óptimo. Además, los hallazgos presentados en este estudio apuntan a avances potenciales en la composición de briquetas de biomasa y los métodos de procesamiento para la generación de energía; esto podría dar como resultado fuentes de combustible más limpias y eficaces, aumentando la sostenibilidad de la producción de energía y reduciendo las emisiones nocivas. Los residuos agrícolas, como la cascarilla de arroz y el residuo de guadañado, podrían ser aprovechados mediante el uso de briquetas de biomasa en sistemas de energía renovable, ofreciendo el potencial de diversificar y mejorar la sostenibilidad de la generación de energía.

Referencias bibliográficas y cibergráficas

- Betancur, L. (2022). Estudio de emisiones de monóxido de carbono en gasodomésticos, y evaluación de la pertinencia de los mantenimientos preventivos [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Biblioteca Digital UdeA. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/28731/1/BetancurLady_2022_EstudioEmisionesMonoxido.pdf
- Celestino, J. M. T., Lating, P. O., Nabuuma, B. & Yiga, V. A. (2023). Effects of clay, gum Arabic and hybrid binders on the properties of rice and coffee husk briquettes. *Results in Engineering*, 20, 101488. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101488>
- Cosa, A. (2023). Revisión y análisis para las distintas alternativas de obtención de hidrógeno como fuente de energía [Trabajo de grado, Universidad de Sevilla]. IdUS. <https://idus.us.es/handle/11441/143161>
- Ferronato, N., Baltocchi, A. P. D., Romagnoli, F., Calle Mendoza, I. J., Gorritty Portillo, M. A. & Torretta, V. (2023). Environmental life cycle assessment of biomass and cardboard waste-based briquettes production and consumption in Andean areas. *Energy for Sustainable Development*, 72, 139–150. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.005>
- Fonseca Cuenca, E. G. & Tierra Tingo, L. F. (2011). Desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y pruebas de producción de gas pobre [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. DSpace ESPOCH. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1883>
- Franco Galán, M. M. & Hernández Velásquez, M. C. (2004). Aprovechamiento de cascarilla de arroz en compostaje y como lecho filtrante para aguas residuales domésticas, como alternativa para

- minimizar su impacto ambiental [Trabajo de grado, Universidad de La Salle]. Ciencia Unisalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
- Gallipoliti, V., Martina, P., Corace, J., Aeberhardt, R. & García, E. (2011). Fabricación de briquetas con aserrín blanco de pino: Análisis inmediato y obtención de su poder calorífico [Informe técnico].
- Huaman, H., Ramírez, M. & Surichaqui, R. (2021). Diseño y elaboración de briquetas ecológicas para la obtención de energía calorífica con residuos agrícolas generados en Masma Chicche, Jauja- 2021 [Trabajo de grado, Universidad Continental]. Repositorio Continental. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/10655/1/IV_FIN_107_TE_Huaman_Ramirez_Surichaqui_2021.pdf
- Ibitoye, S. E., Ajimotokan, H. A., Adeleke, A. A. & Loha, C. (2023). Effect of densification process parameters on the physico-mechanical properties of composite briquettes of corncob and rice husk. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.253>
- Jaider, E. C., Aguilar, S. & Facultad de Ingeniería, U. D. E. (2009). Alternativas de aprovechamiento de la cascarilla de arroz [Trabajo de grado].
- Lucas, A. & Peso, C. (2012). Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad. Universidad de Valladolid. <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>
- Mamani, I., Aghkhani, M. H., Khojastehpour, M. & Rohani, A. (2022). Optimizing the production of fuel briquettes from pruning wastes of urban trees and grass. *Iranian Journal of Biosystems Engineering*, 53(2), 195–214. <https://doi.org/10.22059/ijbse.2022.339335.665472>
- Matteo, C. A. (2022). Sustentabilidad energética: un panorama en la industria petrolera global. *Loginn Investigación Científica y Tecnológica*, 2(1), 2–10. <https://revistas.sena.edu.co/index.php/LOG/article/view/4741/5109>

- Okwu, M. O., Samuel, O. D., Otanocha, O. B., Akporhonor, E. & Tartibu, L. K. (2023). Development of a novel integrated hopper briquette machine for sustainable production of pellet fuels. *Procedia Computer Science*, 217, 1719–1733. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.372>
- Smith, A. K. G., Alesi, L. S., Varanda, L. D., da Silva, D. A., Santos, L. R. O. & Yamaji, F. M. (2019). Production and evaluation of briquettes from urban pruning residue and sugarcane bagasse. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 23(2), 138–143. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n2p138-143>
- Terlizzi, D., Gama, S. & Quintero, I. Y. J. (2021). Transición energética en Colombia: No necesariamente una realidad que se sustenta en el cambio climático. *Verba Iuris*, 17(46), 105–128. <https://bit.ly/3BkKB3u>
- Valiente, A. (2017). Elaboración de briquetas para aprovechamiento del residuo de arroz en beneficios del municipio de El Progreso, Jutiapa [Tesis de pregrado].
- Viquez, J., Caydiid, M. & Adhiambo, P. (2018). Evaluación de la eficiencia térmica en estufas fabricadas y modificadas a biogás. *Energypedia*. https://energypedia.info/images/1/1b/31._Eficiencia_termica_de_estufas_a_biogas.pdf



Capítulo 3

El agua lluvia: una propuesta estratégica de gestión ambiental para el sector floricultor del Oriente Antioqueño (Colombia)

Ainhoa Rubio-Clemente^{a,b}, Ana Maria Cardona^c, Elizabeth Garzón^c, Laura Trujillo-Vargas^c, Carolina García-Ávila^c, Kellys Nallith Salcedo-Hurtado^c

^a Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Energía Alternativa - GEA, Medellín, Colombia

^b Universidad de Antioquia, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Medellín, Colombia

^c Tecnológico de Antioquia, IU, Facultad de Ingenierías, Grupo de Investigación en Tecnologías de la Información y Medio Ambiente - GITIMA, Medellín, Colombia

Resumen

El agua lluvia se constituye como una de las entradas para el ciclo del agua debido a que posibilita la recarga de las fuentes superficiales y subterráneas de forma directa. El cambio climático y la contaminación efectuada al recurso de manera antrópica ha generado que se produzca escasez; es por esta razón que el hombre ha encontrado en el agua lluvia una opción valiosa para solventar las necesidades individuales y de los procesos productivos. En este capítulo, se realizó una revisión del estado del arte sobre el uso del agua lluvia como estrategia de gestión ambiental y se propone el uso de la recolección de estas aguas para el riego y los procesos de producción del sector floricultor del Oriente Antioqueño en Colombia. Se definen algunas características fisicoquímicas que deben tenerse presente para la utilización del recurso y se proponen dos estructuras para la captación y reutilización en el proceso. Se encontró que, si bien, en Colombia el recurso hídrico es el más normado, es necesario que la utilización del agua lluvia para usos directos o indirectos se realice de manera sostenible para no alterar el ciclo del agua. Debe recordarse que, por cuestiones de seguridad, se debe realizar una caracterización básica inicial del agua lluvia para conocer si se puede usar de manera directa o si se deba llevar a cabo un proceso antes de su uso. Como estrategia de gestión ambiental, el agua lluvia posibilita no sólo la reducción de costos en el proceso productivo, sino también la incorporación de políticas de sostenibilidad que garantizan el recurso para futuras generaciones.

Introducción

El agua es la riqueza ambiental más importante en el planeta Tierra porque permite que se desarrolle la vida y se generen diferentes procesos fundamentales alrededor de ella (De Luis Calabuig, 2015). Es una molécula constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, con enlaces polares que le permiten establecer puentes de hidrógeno entre moléculas adyacentes (Galvin, 2008). Se encuentra en forma líquida, sólida y gaseosa lo que le permite hacer parte del ciclo hidrológico y le confiere propiedades microbiológicas, físicas y químicas en las grandes acumulaciones de ésta en el planeta (Pabón *et al.*, 2020).

Actualmente, la dotación de agua dulce escasea por la distribución global, la cual sólo alcanza el 1% en disponibilidad total (Ruiz & Castro, 2018). Esta escasez no se limita a zonas áridas, por el contrario, es un problema que afecta a las regiones con disponibilidad de agua potable, motivo por el cual es considerado una problemática crítica y global (Yáñez-Yáñez & Villacís-Aldaz, 2016). El incremento sostenido en la demanda hídrica por parte de la población, impulsado por diversos factores antrópicos, se ve agravado por los efectos de la contaminación, el cambio climático y la presión ejercida por sectores industriales que operan sin considerar la disponibilidad real del recurso. A esto se suma la reducción en la capacidad de almacenamiento y la pérdida de la capacidad de infiltración de los suelos. Así mismo, deben tenerse en cuenta las variaciones interanuales en los patrones de precipitación asociados a fenómenos monzónicos, la elevada tasa de evaporación y los procesos antrópicos que alteran tanto la intensidad como la frecuencia de las precipitaciones (Chávez-Jiménez & González-Zeas, 2015).

La insuficiencia del recurso hídrico se asocia también con la crisis mundial que se presenta en las zonas donde se dispone del recurso; sin embargo, este presenta altos niveles de contaminación ocasionada además por la sobreexplotación del recurso y la presión demográfica en

las zonas de localización (Mota y Ramírez, 2016). No obstante, lo que parece ser propiamente una crisis de escasez de los recursos hídricos, ya sea de agua cruda o tratada, no es más que una problemática de gobernabilidad y gobernanza del agua (Echeverría-Molina & Anaya-Morales, 2018), la cual precisa de la construcción colectiva de directrices y políticas públicas que involucren la participación activa de diversos actores en la gestión del agua, garantizando que se respeten los principios del enfoque basado en derechos y la sostenibilidad del recurso (Bocadejo, 2018).

La localización topográfica, la conformación del territorio y los periodos climáticos marcados en sus cuencas (bimodal-unimodal) hacen que Colombia pueda contar con una oferta hídrica importante. Sin embargo, a pesar del estado meteorológico de alta precipitación media anual, y la variación climática privilegiada que permite contar con regiones costeras y valles en una amplia extensión geográfica, el país no se escapa de la problemática de escasez del recurso hídrico, y este problema no es generado por la aridez natural, sino que es una consecuencia de las actividades antrópicas y su explotación extrema del recurso hídrico (Trojer, 2017).

La oferta hídrica en Colombia facilita el aprovisionamiento de agua a una fracción de los habitantes del país a través de fuentes superficiales y subterráneas, sin embargo, la disponibilidad de recursos no es homogénea para todas las zonas al interior lo que también lo identifica con la problemática de la escasez y compromete al país a garantizar eficiencia y buen manejo del agua (Hernández Pasichana & Posada Arrubla, 2018). Para Colombia es de vital importancia preservar el recurso para poder asegurar el abastecimiento hídrico en el futuro, además de, encontrar alternativas para provisionarse en el corto, mediano y largo plazo. La utilización del agua lluvia como estrategia de aprovisionamiento es una medida que permite el abastecimiento en tiempos secos y optimiza el recurso, lo cual beneficia tanto al consumidor como al ecosistema (Castelblanco, 2018).

El agua es un recurso valioso, escaso en el tiempo y el espacio, es vulnerable a la contaminación, requiere de un manejo integral y del establecimiento de criterios normativos que regulen su uso,

administración y protección. Es aquí donde la incorporación de la gestión del agua juega un papel determinante al ser un mecanismo que posibilita solucionar conflictos, además de atender los diversos intereses relacionados con la cantidad y calidad del agua (Martínez *et al.*, 2018). Gestionar el recurso implica diseñar y utilizar elementos prácticos y eficaces para resolver los conflictos que se presentan (Arboleda Montaña, 2016).

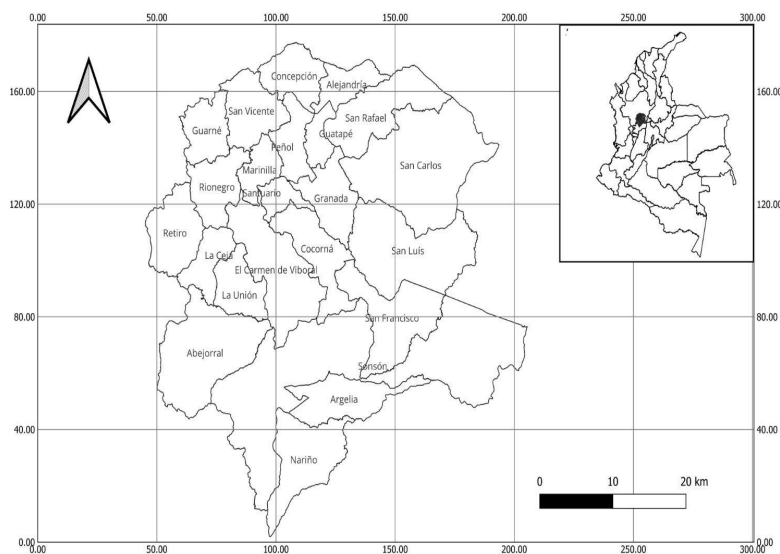
El recurso hídrico es el más normado a nivel ambiental en Colombia, cuenta con una política nacional y diferentes lineamientos para que tanto las empresas, organizaciones, entidades gubernamentales y comunidad en general apliquen estrategias que permita gestionar el uso del recurso al interior que traiga como consecuencia la disminución de la demanda y la reutilización de las aguas al interior.

El agua es fundamental en el manejo de la floricultura, ya que este es uno de los sectores que más usa el recurso para la producción de las flores en el país (Vanegas Rojas *et al.*, 2015). Las flores son en Colombia un producto agrícola no alimenticio, único dentro del catálogo de exportaciones; clasificado como uno de los más valiosos en el comercio internacional (Vanegas & Restrepo, 2016). Se estima que un cultivo de flores requiere aproximadamente 37m³/ha-día de agua para el riego usando sistemas controlados. A partir de medidas experimentales se ha logrado identificar que del agua utilizada para riego el 54% proviene del agua lluvia y el 46% de fuentes hídricas superficiales y subterráneas (Acevedo & Jiménez, 2016). Como actividad económica se viene desarrollando desde la década de 1960 en Colombia, estableciéndose desde entonces como una actividad de rápido crecimiento. Al ser una práctica de agricultura intensiva combina la aplicación de diferentes tecnologías en la práctica del cultivo, lo relacionado con los insumos y la optimización en el uso del espacio. El objetivo de este artículo fue proponer la implementación de la reutilización del agua lluvia en la producción de flores buscando así incorporar la sustentabilidad corporativa a través de la optimización del recurso hídrico como una estrategia de gestión ambiental.

Área de Estudio

El Oriente Antioqueño (**Figura 1**) está dentro de las 9 subregiones que dividen el Departamento de Antioquia (López-González, Mesa-Callejas & Tabares-Orozco, 2013). Cuenta con un área de 7.021 km² y 706.477 habitantes, que representan el 10,4% de Antioquia y el 1,4% de Colombia (DANE, 2019). Está integrado por 23 municipios distribuidos según sus dinámicas sociales, económicas, culturales en cuatro subregiones ecológicas que contemplan ecosistemas como altiplano, embalses, bosques y páramos (López-González, Mesa-Callejas & Tabares-Orozco, 2013). Las actividades productivas como el cultivo de flores, café, caña panelera, papa, frijol, frutales y maíz, junto con la ganadería de leche, la operación de embalses y el turismo, constituyen el sustento económico de la región, aportando en conjunto el 8,53 % al Producto Interno Bruto (PIB) departamental (Giraldo & Álzate, 2016).

Figura 1. Área de estudio con su distribución político-administrativa



Fuente: Elaboración propia. 2025

Esta subregión tiene relevancia a nivel departamental y nacional, por su ubicación estratégica, por ser una zona clave en la generación energética en el sector sur occidental colombiano, lo que se sustenta en los seis embalses y cinco centrales hidroeléctricas (Playas, Guatapé, San Carlos, Jaguas, y Calderas) que posee, las cuales producen el 29% de la energía nacional y el 73% del total departamental. Asimismo, es una de las subregiones con mejor sistema vial del país, conecta la capital de Colombia con las costas, además de establecer conexión vial entre dos de los centros urbanos más grandes del país Medellín y Bogotá. El Oriente Antioqueño ha desarrollado su crecimiento económico en base a los cultivos de flores lo cual ha impactado directamente la infraestructura vial y de servicios (CCOA, 2020).

La densidad poblacional lo posiciona como la segunda subregión más poblada del departamento, siendo los municipios de Rionegro y La Ceja los de mayor población (CCOA, 2018). Según el reporte de concepto económico de la Dirección de Competitividad y Desarrollo Empresarial de la Cámara de Comercio del Oriente Antioqueño para el año 2018 se proyectó una población de 595.030 habitantes, lo que equivale al 8,89% de la población de Antioquia, sin embargo, en el año 2020 ya se sobrepasó la proyección población, lo que demuestra la expansión socioeconómica del territorio (Vega-Monsalve & Ruiz-Restrepo, 2018).

En el panorama del cultivo de flores del Oriente Antioqueño y la gestión del recurso hídrico, es importante tener en cuenta las áreas sembradas, las áreas cosechadas, el volumen de producción y rendimiento de algunos cultivos permanentes. Contar con información precisa sobre el uso y disponibilidad del recurso hídrico es fundamental para una adecuada distribución y gestión del agua en sectores específicos. Conocer las características del terreno permite orientar de manera más eficiente las decisiones relacionadas con el manejo productivo, en función tanto de la oferta hídrica disponible como de los recursos naturales presentes. En este contexto, la huella hídrica verde que representa el volumen de agua de lluvia incorporado en los productos agrícolas cobra especial relevancia en Colombia, particularmente en el sector floricultor del Oriente Antioqueño. Para el año 2017, esta región contaba con un total de 1.726,80 hectáreas destinadas al cultivo de flores, de las cuales

1.395,50 hectáreas estaban en producción activa. Estas cifras reflejan la importancia económica y ambiental del sector, así como la significativa demanda hídrica asociada a este tipo de cultivo. Es importante destacar que, hasta la fecha, estas áreas mantienen valores similares, lo que subraya la necesidad de continuar fortaleciendo estrategias de gestión sostenible del agua en la región (*Planeación*, 2017).

El Agua Lluvia

El agua es un recurso fundamental que hace que en el planeta Tierra tenga condiciones diferenciales comparados con otros en el sistema solar (Takeuchi & Tanaka, 2020). Del volumen total de agua disponible en la superficie de la Tierra, el 97% es agua salina, el 2% se encuentra en forma de hielo y glaciares y sólo el 1% es agua dulce (Silva, Sousa, & Carvalho, 2015). El hecho de que el agua se halle presente en todos los estados permite el desarrollo de la vida para soportar todas las funciones vitales (Suleiman *et al.*, 2020). El agua es un recurso esencial para diversos propósitos, tales como el consumo humano, la agricultura, la ganadería, el uso industrial, entre otros (Vargas-Pineda *et al.*, 2018). La pérdida de conciencia sobre el valor del agua sumado a la contaminación que se está experimentando en los últimos años en el recurso hídrico, ha llevado a que esta sea un bien escaso que se deba proteger, potenciando las estrategias de reutilización de ésta siempre que sea posible, como es el caso particular del agua lluvia (Takeuchi & Tanaka, 2020).

El ciclo hidrológico es el proceso mediante el cual el agua se mueve desde los diferentes compartimentos en la hidrosfera (**Figura 2**). La precipitación por su parte es un fenómeno que consiste en el descenso de partículas de agua líquida o sólida condensadas en una nube, que cruzan por la atmósfera y que alcanzan el suelo (Valencia *et al.*, 2023; IDEAM, 2017; Ledesma, 2000). Para que se formen nubes se requiere que la atmósfera contenga vapor de agua susceptible de ser condensada o congelada. Este vapor de agua procede fundamentalmente de la evaporación de fuentes superficiales con mayor proporción del mar, como el nivel del mar permanece constante, esto significa que las

pérdidas por evaporación son compensadas por las aportaciones de las precipitaciones (Ledesma, 2000).

El proceso específico que conduce a la precipitación aún es motivo de estudio, más lo que sí se sabe es que en una nube las gotas de agua tienen un diámetro promedio de 0,001 mm y se encuentran separadas unas de otras por enormes distancias. La condensación no comienza hasta que el vapor de agua cuenta con una superficie o cantidad de núcleos de condensación sobre los que pueda condensarse. La nucleación puede ser homogénea, cuando se lleva a cabo sobre partículas sólidas como sales que proceden desde los océanos, partículas sólidas provenientes de procesos de combustión incompleta o sobre aerosoles producto de las diversas sustancias emitidas a la atmósfera. La condensación también puede producirse a partir de los núcleos de vapor de agua, los cuales forman gotas en las nubes que pueden unirse a las gotas más grandes de los núcleos de condensación o sublimación (Dall'Osto & Simó, 2021; Lohmann & Feichter, 2005; Ledesma, 2000). El valor de precipitación en estado líquido equivale al volumen de agua lluvia que recorre un espacio en un tiempo específico. En las nubes frías se presentan temperaturas negativas en una gran porción razón por lo cual se puede presentar cristales diminutos sobre los cuales se puede desarrollar núcleos a partir de procesos de sublimación, lo que implica que existan gotas de agua líquida super enfriada, es decir en estado de subfusión. Dado que la tensión de saturación es mayor sobre el agua que sobre el hielo, se producen flujos de vapor hacia los cristales lo que implica que estos se engrosen, se aglomeren y cuando cae la precipitación ya sea en forma líquida o sólida por la fusión que se realiza en la nube (Dall'Osto & Simó, 2021, Ledesma, 2000). La precipitación se cuantifica en milímetros de lluvia y se realiza su determinación a través de una columna vertical de agua que se llena sobre una superficie que está a nivel el cual se denomina pluviógrafo o pluviómetro. Esta medida debe hacerse en el lugar donde se genera. Numéricamente un milímetro de precipitación equivale a un metro cuadrado en superficie (López-Hernández *et al.*, 2017).

Figura 2. Ciclo hidrológico



Fuente: Propia.

La neblina es un fenómeno meteorológico caracterizado por la presencia de una suspensión de diminutas gotas de agua en el aire, con diámetros que varían entre 1 y 40 μm , las cuales forman una capa de nubes baja que se desplaza a ras del suelo, reduciendo la visibilidad y creando un entorno húmedo. Su formación está asociada a la condensación del vapor de agua en la atmósfera, proceso que ocurre cuando el aire se enfría hasta alcanzar su punto de rocío, especialmente en condiciones de alta humedad relativa. Como fenómeno está influenciado por factores como la inversión térmica, corrientes marinas frías, como la corriente peruana, la altitud, la forma y la disposición del terreno, y fenómenos climáticos como el anticiclón del Pacífico Sur Oriental (Percy *et al.*, 2006).

La variabilidad de la precipitación se relaciona con diversos fenómenos climatológicos los cuales están vinculados con la diferenciación estacional. En este contexto, para su cuantificación se usan diferentes

escalas como la temporal, la intraestacional, interanual e interdecadal. En la primera escala las oscilaciones del clima abarcan los periodos climáticos correspondientes a sequía y lluvia los cuales son originados por la migración en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Mientras que para la escala intraestacional se analizan las variaciones que se efectúan en diez días o hasta en dos meses, las cuales se relacionan con la variabilidad climática. En la escala interanual, tiene conexión con los fenómenos de La Niña, El Niño y ENSO (Oscilación del sur). Finalmente, la escala interdecadal que se refiere al transcurso de diez años con presencia de fluctuaciones que en comparación con la escala anual tienen una menor amplitud, pero permite determinar a largo plazo algunas tendencias (IDEAM, 2017).

Forero *et al.* (2018) encontró que al revisar la variabilidad climática en Colombia en el reporte anual de los índices hidrometeorológicos del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) o el anuario estadístico de la Gobernación de Antioquia, se evidencia que el enfoque del análisis de las precipitaciones se lleva a cabo de manera anual, lo que indica el uso de las escalas temporales para la estimación de la precipitación; adicionalmente, considera las escalas horarias, lo que se asocia a las altas precipitaciones y a la respuesta de las fuentes hídricas las cuales presentan riesgo de inundaciones y crecientes súbitas, motivo por el cual esta magnitud en el tiempo permite la generación de sistemas de alarmas tempranas. Conocer la distribución del fenómeno de precipitación mejora notablemente la actividad de planificación, ayuda a contar con un calendario agrícola, permite cuantificar la disponibilidad y la escasez del recurso hídrico de un territorio, ayuda en el diseño de construcciones de redes de alcantarillado agrícola (Sandoval Betancourt, 2016).

En el Oriente Antioqueño se tiene una precipitación promedio anual de 72,5 mm de lluvia, sin embargo, se ha identificado que se le da un uso incorrecto al agua potable y una inutilidad al agua lluvia lo que genera una presión importante de los recursos hídricos superficiales (Vanegas *et al.*, 2023). Según el Departamento de Planeación (2017), el sector floricultor es el principal consumidor de agua en la región, siendo el riego una de las actividades con mayor demanda tanto de agua potable

como en términos de generación de contaminación del recurso hídrico. No obstante, esta situación representa una oportunidad para promover la implementación del aprovechamiento de agua lluvia en los distintos procesos productivos del sector, integrando así tecnologías sostenibles a la gestión ambiental que desarrollan las empresas floricultoras (Vanegas *et al.*, 2023).

Cosecha de Agua Lluvia

La cosecha de agua no es una práctica nueva que se esté ejecutando, si no una técnica que ha sido utilizada por las civilizaciones desde hace miles de años, aplicando una gran variedad de técnicas y prácticas (Hendricks, 2018). Este proceso facilita el aumento en la interceptación, retención, almacenamiento ya sea superficial, subsuperficial o subterráneo y regulación del agua de lluvia que cae sobre un territorio durante un determinado período de tiempo, buscando generar o incrementar una reserva local o producir descargas en los cauces menos abruptos y regulares (Mendoza & Gaviria, 2019; Hendricks, 2018; Martos *et al.*, 2018). La cosecha de agua en todos los territorios como zonas muy áridas como en el caso del Medio Oriente donde permite adquirir, almacenar y posteriormente usar el agua para diversos fines o en zonas donde se presentan riesgos de inundaciones o avenidas torrenciales donde el flujo de los caudales representa un riesgo tanto para las poblaciones como para las infraestructuras (Molden *et al.*, 2003).

Estos sistemas se les ha dado diferentes nombres dependiendo la región o el país, por ejemplo, en Irán, Afganistán y Pakistán se les denomina *ganat* o *khariz*; en el noroeste de África *foggara*, en la India *khadin*, en Israel *negarim*, mientras que, en Perú se conoce como “crianza de agua” y en inglés se reporta como “*water harvesting*” o “*rainwater harvesting*” (Hendricks, 2018). El sistema de cosecha puede ser aplicado de manera *in-situ* donde se genera recaudo y almacenamiento del agua en el mismo lugar (Vohland & Barry, 2009; Biazin *et al.*, 2012) o *ex situ* donde se realiza la recolección del agua en grandes áreas produciendo zonas de drenaje, los cuales posteriormente se conducen y almacenan para su uso (Dile *et al.*, 2013).

La cosecha de agua lluvia mejora la productividad dado que aumenta la disponibilidad del recurso hídrico y regula el consumo de fuentes directas y tratadas en la misma zona o cercanas (Fox & Rockstrom, 2003; Torres *et al.*, 2011; Bouma *et al.*, 2016), además de incrementar la resiliencia y la diversificación a diferentes actividades las cuales pueden realizarse bajo criterios de sostenibilidad (Dile *et al.*, 2016) permitiendo a los productores locales, campesinos y empresarios adaptarse a los efectos que trae consigo el cambio climático (Howden *et al.*, 2007; Delgado *et al.*, 2013). Otra de las ventajas de recolectar agua lluvia es la recarga de las aguas subterráneas y la conservación del nivel freático. Las zonas o actividades donde se implementa la cosecha de agua pueden llegar a ser autosuficientes en términos de cubrir las necesidades de agua para uso doméstico no directo, o industrial, de forma tal que no se dependa del gobierno o cualquier otro organismo local para cubrir necesidades (Mendoza & Gaviria, 2019).

La cosecha de agua es una técnica versátil dado que combina diversos mecanismos de captura, almacenamiento, distribución y regulación del recurso lo cual posibilita que pueda ser implementada en múltiples sectores tanto a nivel productivo como para el cubrimiento de necesidades básicas de la población. Uno de los beneficios de su implementación es que mejora las condiciones hídricas en espacios territoriales muy locales a nivel micro; lo que favorece por ejemplo la agricultura familiar y la provisión de la canasta alimenticia básica (Hendricks, 2018). En este sentido, recoger agua lluvia a medida que precipita parece inmensamente sensato en las áreas que luchan para hacer frente a las necesidades de agua potable; es decir, en aquellas zonas donde los sistemas convencionales de suministro de agua no alcanzan a cubrir las necesidades de las comunidades o donde puede ser usada como estrategia para el ahorro de agua (Peña, 2016).

En los últimos 30 años se han desarrollado diversas técnicas para la captación del agua lluvia, las cuales se han ido perfeccionando para garantizar un almacenamiento de tal modo que a estas aguas se les pueda dar un uso adecuado para sustituir la práctica del consumo de agua potable en algunos procesos que son altamente demandantes y que no requieren que el agua haya pasado previamente por ciertos

procesos de desinfección (Hugues, 2019). Dentro de las estrategias para la captación de aguas lluvias, se distinguen dos enfoques principales: la microcaptación y la macrocaptación. La microcaptación se basa en la recolección de escorrentía superficial a pequeña escala, mediante el uso de estructuras como tejados, superficies impermeables o membranas permeables, que canalizan el agua hacia sistemas de almacenamiento. Por otro lado, la macrocaptación implica la recolección de escorrentía proveniente de áreas extensas. Esta puede clasificarse en macrocaptación interna, cuando las zonas de captación se encuentran adyacentes al área de cultivo, y macrocaptación externa, cuando dichas zonas están ubicadas a cierta distancia del terreno agrícola. En ambos casos, el objetivo es facilitar la infiltración del agua en el suelo cultivado, optimizando así su disponibilidad para las plantas y promoviendo una gestión sostenible del recurso hídrico (Manrique & Pelier, 2016).

La cosecha de agua en el techo de una vivienda o en alguna otra estructura que sea impermeable, es una actividad que consiste en la recolección de la escorrentía que se produce en esas superficies, algunas de estas estructuras se refieren a establos, patios de tierra, techos, superficies rocosas, hormigón o plástico. La recolección de agua lluvia a través de techos representa una alternativa eficiente para obtener agua de calidad superior en comparación con muchas fuentes hídricas superficiales, las cuales suelen estar más expuestas a la contaminación de origen antrópico. No obstante, para garantizar la eficacia del sistema, es fundamental una adecuada planificación desde las etapas iniciales. Esta planificación debe contemplar la selección del método de captación más apropiado, considerando tanto la magnitud del déficit hídrico en la región como las condiciones ambientales y socioeconómicas locales. Solo así es posible diseñar soluciones sostenibles y adaptadas a las necesidades específicas de cada comunidad (Delvalle, 2017).

La intensidad de la lluvia, la duración en el tiempo, la pendiente del terreno, el tipo de suelo, las condiciones de vegetación y la superficie de captación condicionan la capacidad de la aplicación de la técnica. El diseño de un mecanismo *in situ* de cosecha de agua precisa de la cuantificación del total de agua lluvia susceptible de ser capturada sobre una lámina ubicada en una zona de pendiente suave, o localizada

sobre el tejado de una casa, que permitan obtener un valor mínimo de precipitación medido en intensidad de lluvia por hora equivalente a 5 mm o 0,5 cm; que la superficie o lámina con la que se capture cuente con una área de 100 m², que el factor de captación sea 0,52 y el caudal de agua captable igual o mayor a 250 L/h (Mendoza & Gaviria, 2019).

En las lomas costeras, la cosecha de agua puede realizarse mediante la captación y aprovechamiento de la neblina, una fuente hídrica alternativa especialmente valiosa en zonas áridas o con escasa precipitación. Para implementar esta técnica, es esencial identificar ecosistemas donde se presenten con regularidad neblinas invernales costeras, las cuales suelen estar asociadas a una vegetación rica en especies endémicas y plantas silvestres. En estos entornos, es posible instalar paneles rectangulares fabricados con mallas de material sintético, diseñados para capturar las diminutas gotas de agua presentes en la niebla. Estas gotas se condensan sobre la superficie del panel, transformándose del estado gaseoso al líquido, y posteriormente pueden ser recolectadas para diversos usos, contribuyendo así a la seguridad hídrica local de manera sostenible (Molina & Guevara, 2009; Torres, 1981). Esta tecnología es muy apropiada y sustentable para áreas como desiertos costeros o en bosques de nieblas (Arias & Torres, 1990; Cerodio, 2004).

Otra técnica utilizada para la cosecha de agua son los denominados atajados o lagunas o lagunillas, las cuales se originaron por iniciativa de los campesinos o por organizaciones, sin el uso de maquinaria pesada, en terrenos donde se han desarrollado actividades como excavaciones, producción de adobes y/o modificaciones del suelo que han generado zonas de almacenamiento. Estos sistemas de capacidad máxima de 300 m³ se consideran pequeños y pueden utilizarse para bebederos del ganado o para riego familiar como pequeñas represas. Son sistemas muy utilizados a nivel agrícola para pequeños cultivos. A partir de 1970 se empezaron a construir a mayor escala, incluyendo el uso de maquinaria pesada como tractores e integrando obras civiles complementarias como canales colectores, cámaras de sedimentación, canales de ingreso, vertederos, bebederos para el ganado, cercos perimetrales, etc., los cuales han multiplicado el uso de esta técnica a nivel gubernamental y local para satisfacer la demanda de recurso hídrico tanto a nivel agrícola como pecuario. Dentro de las ventajas que

tiene la aplicación de esta técnica es la capacidad de almacenamiento del recurso hasta en 1.300 m³ los cuales permiten regar 13.000 m² que pueden satisfacer la demanda de siembra de variados cultivos (Goetter & PROAGRO, 2011).

El suministro de agua en áreas urbanas y rurales es un desafío global para los países, influenciado por el crecimiento de la población, la sobreexplotación de recursos hídricos, y el cambio climático, entre otros factores. En este contexto, la recolección de agua se presenta como una opción que brinda beneficios sociales, económicos y ambientales, especialmente a las comunidades de bajos ingresos (Valencia *et al.*, 2023). La *Agenda global 2030* establecida para los *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*, subraya que el recurso hídrico es un eje estratégico que posibilita a los diferentes países el logro de los 17 objetivos; en este contexto, es fundamental garantizar que las comunidades tengan acceso no solo al agua, sino también a sistemas adecuados para su tratamiento y disposición final. Esto incluye tanto la gestión responsable de las fuentes hídricas superficiales como la infiltración controlada en el suelo, lo cual contribuye a la recarga de los acuíferos subterráneos. Promover este enfoque integral permite avanzar hacia una gestión sostenible del recurso hídrico, adaptada a las condiciones ambientales y sociales de cada territorio (Organización de Naciones Unidas - ONU, 2017).

Según el Banco Mundial (2018), aproximadamente 2.100 millones de personas carecen de acceso a una fuente segura de agua potable, y más de 4500 millones no cuentan con servicios de saneamiento adecuados, lo que refleja una gestión inadecuada del agua para evitar descargas contaminantes. América Latina alberga el 30% de las reservas mundiales de agua dulce, equivalentes a 12,3 millones de km³. Sin embargo, el 21% de su población, es decir, unos 140 millones de personas, no tiene acceso a agua potable, y más de 400 millones, que representan el 60% de la población, carecen de un saneamiento adecuado. (BID, 2022; Bocco, 2022). Cosechar agua no sólo satisface las necesidades de la población, sino también permite que a nivel industrial, agrícola e institucional se gestione el recurso hídrico buscando contribuir al cumplimiento de la política nacional del agua y a las diferentes directrices que desde los *Objetivos de Desarrollo Sostenible* se vienen trabajando.

Parámetros *in situ* Significativos del Agua Lluvia

Desde 1998 el *IDEAM* ha sido el encargado de operar el programa de monitoreo del agua lluvia en Colombia, lo que les posibilita conocer los cambios en volumen, intensidad, duración y frecuencia de acuerdo con las diferentes alteraciones atmosféricas que se derivan de las actividades antrópicas de los seres humanos. El agua presenta unas características físicas, químicas y microbiológicas las cuales permiten saber qué uso se le puede dar al agua lluvia (Ospina *et al.*, 2016).

Una característica química del agua lluvia es el valor del pH, el cual indica la concentración de iones hidrógeno. La tendencia natural del agua lluvia es ser ácida, lo que se les atribuye a las reacciones químicas que ocurren entre el dióxido de carbono (CO_2) con el vapor de agua que se forma en la atmósfera, el cual al interactuar generan ácido carbónico (H_2CO_3). Sin embargo, debido a las actividades industriales y al tráfico, el uso de combustibles fósiles incrementa las emisiones de CO_2 , óxidos de azufre (SO_x) y óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales intervienen en la química de la atmósfera, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3), respectivamente. Así, la lluvia se puede clasificar de acuerdo con su pH en lluvia ligeramente ácida ($4,7 < \text{pH} < 5,6$), Lluvia medianamente ácida ($4,3 < \text{pH} \leq 4,7$), lluvia fuertemente ácida ($\text{pH} \leq 4,3$) y lluvia no ácida ($\text{pH} > 5,6$) (Montañez, 2016).

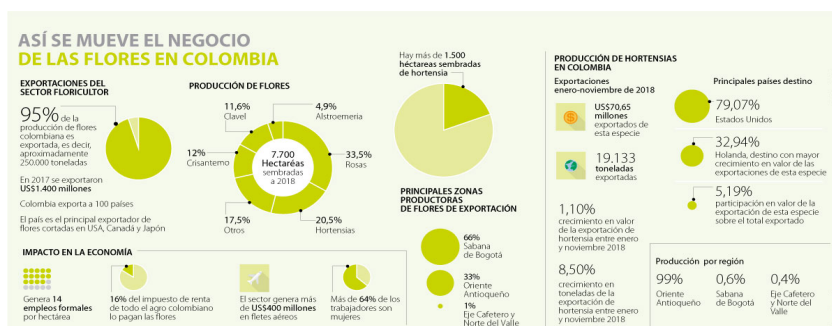
Otro de los parámetros importantes es la conductividad eléctrica la cual se demarca como la capacidad que tiene el agua para conducir la corriente eléctrica. La conductividad del agua lluvia se ve afectada por la presencia de iones que provienen de sales disueltas y materia inorgánica, que pueden estar presentes en la atmósfera debido a la actividad antrópica. En el momento de la condensación, el agua adquiere un aumento en el nivel de gases como el CO_2 , NO_x y el ozono (O_3) por lo que se debe tener en cuenta el análisis y resultados de estos (Montañez, 2016).

El Sector Floricultor en el Oriente Antioqueño y su Problemática Con el Agua

La floricultura es un tipo intensivo de agricultura con un ingreso por unidad de área mayor que cualquier otra rama de la agricultura (Manikas & Abeliotis, 2019). La industria de la floricultura proporciona un terreno fértil para el desarrollo y la comercialización de cultivos florales (plantas de crecimiento rápido, flores, follaje o plantas de interior; plantas cortadas, flores cortadas, etc.), siendo un elemento relevante para industrias como la industria paisajística, la industria de fabricación de aceites esenciales, las confiterías, los perfumes y medicamentos. La industria de la floricultura es el negocio lucrativo de muchos países, debido a sus diversos resultados como la generación de más empleo, la obtención de rendimientos más altos y más ganancias de divisas a los productores del país. Este producto demostró un aumento de la demanda y alto rendimiento por unidad de área en comparación con otros productos básicos, basados en esta información los productores se atrevieron a incrementar cada vez más la cantidad de cultivos (Kumar & Bandhu, 2020).

Colombia en el año 2018 ocupó el segundo puesto a nivel mundial en exportación de flores, siendo Países Bajos el primer exportador alcanzando un nivel de ventas de 4.672.015 mil dólares (García, 2019). Sin embargo, en Colombia las exportaciones han aumentado un 4% para el año 2018 respecto al año anterior (García, 2019). En la **Figura 3** se puede apreciar cómo se desarrolla el aporte económico del sector floricultor en los últimos años, al igual que su crecimiento a nivel nacional, lo que refleja los múltiples esfuerzos que se están desarrollando desde el gobierno y las asociaciones para mejorar el posicionamiento en el mercado internacional (Sanmartín *et al.*, 2024).

Figura 3. Aporte del sector floricultor a las exportaciones del país



Fuente: CCOA (2019).

La tasa de cambio y el posicionamiento de las flores en el mercado ha posibilitado que el sector floricultor se ratifique tanto a nivel regional como local, para lo cual las condiciones geográficas y logísticas determinan un papel esencial en el desarrollo de esta actividad en el territorio. Es relevante destacar que el sector crea 17 empleos por cada hectárea cultivada; en este contexto, durante el año 2018 se generaron 140.000 puestos de trabajo, tanto directos como indirectos, la mayoría de los cuales fueron ocupados por madres cabeza de familia (Vukajlović & Đurović, 2017).

En el Oriente Antioqueño la floricultura satisface el 20% de la producción nacional de flores, a partir de las 1.340 hectáreas destinadas a la producción, de las cuales Asocolflores tiene bajo convenio 615 hectáreas, que aportan el 99% de la producción con la que se satisface la demanda de exportación del país. La producción de flores es parte importante de la economía del Oriente Antioqueño, además de ser un factor determinante para la dinámica económica y social de la región (Orrego, 2020). La ubicación estratégica del Oriente Antioqueño genera una ventaja competitiva a nivel departamental y nacional, ya que cuenta con un clima favorable para el cultivo de las flores, infraestructura vial en excelentes condiciones y servicios adecuados para el crecimiento del sector floricultor.

La agricultura de las flores es un gran generador de empleo, se estima que por cada hectárea sembrada es necesario contratar entre 10 a 15

trabajadores para el mantenimiento de los cultivos, es decir; alrededor de 3.000 a 4.500 personas subsisten gracias a la floricultura, y de este número de personas el 75% son cabezas de familia; lo que demuestra la importancia del sector floricultor para la región del Oriente Antioqueño. Actualmente, se están implementando en la mayoría de los cultivos, acciones ambientales que favorezcan el desarrollo de la actividad económica con menor cantidad de implicaciones ambientales lo que demuestra el compromiso y responsabilidad de las empresas frente al proceso. Una estrategia desarrollada en pro de este fin, es el cambio de tecnologías que contaminan el medio ambiente, por otras que permiten la disminución de impactos ambientales tales es el caso de los colorantes y los mecanismos para el tratamiento de las aguas residuales los cuales generan mayor impacto y relevancia para el sector floricultor del Oriente Antioqueño por las condiciones climáticas, la cantidad y calidad del recurso hídrico (Restrepo, 2016). Los cultivos de flores requieren para su cosecha agua y luz controlada con la finalidad de garantizar una producción acorde a las características del mercado. Para el riego se estima que se usa 37 m³/ha-día de agua y que el crecimiento puede detenerse en condiciones de luz desfavorables; trayendo como consecuencia que se aborten las flores resultando en un brote ciego (Naing & Kim, 2016).

La producción de flores es un mercado beneficioso ya que genera grandes regalías para Colombia, pero como todas las actividades agropecuarias tiene un lado oscuro y una problemática que aqueja al país y al mundo, ya que genera pasivos ambientales en el componente hídrico (Girardi & Gollo, 2018). Aunque se han logrado avances significativos en la reducción de los impactos ambientales en la producción de flores, especialmente en lo que respecta al consumo de agua, se ha detectado un efecto ambiental negativo relacionado con las exportaciones, los cuales están asociados con el uso de diferentes productos químicos que buscan reducir o eliminar las manchas, el desgaste, o las marcas en los pétalos o el follaje (De LC, 2018).

Los impactos generados al recurso hídrico por la actividad del cultivo de flores son ocasionados por los residuos de plaguicidas que son usados en la fumigación, y como resultado contaminan las aguas subterráneas

de los terrenos de cultivo y algunas fuentes de agua superficial debido al mal manejo de dichos residuos y algunos vertimientos puntuales. La dinámica natural del drenaje del suelo se altera por la transformación de las características físicas, químicas y los cambios en la estructura, estos impactos son generados por actividades como la nivelación del terreno y la remoción de la cobertura vegetal (Villalobos & Villalobos, 2018).

A pesar de conocer el resultado de la deficiente gestión en los floricultivos, la cual se refleja en los pasivos ambientales del país y los municipios, existen múltiples empresas que aún siguen usando procesos que no son amigables tanto con el medio ambiente como con la salud de los trabajadores. Algunos de estos son los sistemas de riego que malgastan agua, el descontrol de los tiempos de ingreso a los cultivos después de aplicar productos químicos, o residuos de agua con productos químicos usados en nuevas labores. Por estas razones, es necesario plantear alternativas que mitiguen dichos pasivos ambientales, como es el caso de la implementación de medidas encaminadas al ahorro de agua y disminución de vertimientos contaminados de afluentes superficiales (Ardila, 2018).

El Oriente Antioqueño se caracteriza por presentar altas precipitaciones promedios al año lo que indica que es un candidato para la cosecha de agua. Según Planeación (2017) para un área de 7.103 km² se dispone de una precipitación promedio anual de 72,5 mm los cuales pueden ser optimizados a partir de diferentes técnicas de cosecha de agua y, en consecuencia, gestionar mejor el recurso y disminuir las afectaciones a los mantos y los suelos. En la Tabla 1 se presenta la discriminación de las precipitaciones para los municipios con potencial de uso del agua lluvia para el sector floricultor en el Oriente Antioqueño como alternativa de mitigación para la reducción del alto consumo de agua.

La gestión ambiental y la implementación de la cosecha del agua en el sector floricultor es de vital importancia. Sin embargo, la normativa ambiental vigente en Colombia establece que es primordial usar el agua para el consumo humano, en segunda instancia preservar la flora y la fauna y posteriormente se podrá dar otros usos al recurso como puede ser el agrícola. La exposición de prioridades mencionadas anteriormente puede conducir a las actividades agrícolas a una situación delicada ya

que estas requieren competir por el uso del agua, pero esto no tendría que ser una limitante para el desarrollo de estas industrias ya que existen alternativas que pueden ser aprovechadas sobre todo en esta subregión del Oriente Antioqueño dados sus índices de precipitación.

Tabla 1. Precipitación promedio anual, por municipios

Subregión y municipios	Área del municipio (km²)	Precipitación promedio anual por municipio (mm/año)
Abejorral	497	2.390
Aleandría	151	5.074
Argelia	257	4.194
Cocorná	221	3.853
Concepción	169	2.965
El Carmen de Viboral	453	2910
El Peñol	145	2.422
El Retiro	266	2.062
El Santuario	76	2.638
Granada	185	3.180
Guarne	153	2.499
Guatapé	70	4.975
La Ceja del Tambo	133	2.099
La Unión	200	2.412
Marinilla	116	2.167
Nariño	317	3.307
Rionegro	198	2.168
San Carlos	719	2.946
San Francisco	368	4.990
San Luis	458	4.579
San Rafael	366	3.965
San Vicente Ferrer	246	2.199
Sonsón	1.339	2.493
Oriente	7.103	72.487

Fuente: Planeación (2017).

La disponibilidad y ahorro del agua se puede asegurar mediante estrategias como la medición del agua que ingresa al cultivo, la evaluación e interpretación de la oferta, la cual sería el indicador del agua que se está tomando para el riego del cultivo cuantificado mediante un medidor. Por otro lado, es importante contar con el dato de la estimación de aguas lluvia para cultivos en invernaderos y como alternativa de recolección de agua, cuya medición puede ser cuantificada por un pluviómetro. A su vez, es necesario realizar una medición de los consumos de agua en el cultivo, lo cual es interpretado como la demanda requerida para mantener la productividad y las actividades de apoyo como fertilización, propagación, aspersión y uso doméstico. El consumo de agua en la actividad del riego es de aproximadamente un 85% de la cantidad total de agua que entra al cultivo, es importante para asegurar el rendimiento del proceso productivo que cuente con estaciones de riego y medidores para la cuantificación del agua usada (Calera & Garrido, 2016). El consumo de agua en la propagación de la flor necesita una cantidad igual o superior, a la cantidad usada en el riego para la producción de esta. Se recomienda a los cultivos que cuenten con áreas de propagación realizar la medición de los consumos de agua instalando medidores, con fin de cuantificar qué proceso consume más agua.

Es importante tener en cuenta que el agua utilizada para la aspersión de plaguicidas en el cultivo se debe cuantificar con los volúmenes de agua utilizada en los tanques de mezcla de plaguicidas que se aplican durante el día al cultivo, esta información debe ser registrada y tomada en los programas de aspersión. Después de la cosecha, el agua puede ser utilizada para la hidratación, la preservación de la flor y la limpieza del área, lo que implica que es necesario medir el volumen de agua capturado y realizar el cálculo de volumen necesario para disponer acorde al diagrama de proceso del cultivo. Finalmente, es necesario contabilizar el consumo de agua para uso doméstico que por lo general requiere una cantidad de agua entre 40 y 70 L por trabajador para llevar a cabo sus actividades dentro de la jornada laboral. Cada uno de estos parámetros es necesario que sean medidos en un cultivo de flores, ya que con estos datos se puede crear un plan para el ahorro del agua, se puede prevenir el sobre uso del recurso hídrico y se pueden minimizar los

impactos generados al medio ambiente (Zapata & Playán, 2018). Estos parámetros pueden ser suplidos mediante un sistema de recolección de agua lluvia.

Un sistema de gestión ambiental normalmente se aplica mediante la norma ISO 14001:2015 (ISO 14001, 2015), el cual posibilita que las empresas puedan evidenciar el compromiso que tienen con la protección del medio ambiente, a través de la gestión de los riesgos ambientales que se asocian a la actividad industrial desarrollada. La implementación de ISO en las empresas, sean o no pertenecientes al sector floricultor, concede algunos beneficios económicos, ambientales y de posicionamiento en el mercado. La eficiencia de la aplicación de un sistema de gestión ambiental en una organización depende del ciclo (Planear, Hacer, Comprobar, Actuar) ya que es iterativo y asegura la mejora continua de la organización. Es importante que las soluciones que vayan a aplicarse en la organización sean probadas sistemáticamente, además es necesario evaluar los resultados obtenidos aplicando solo los que se compruebe que funcionan (Standardization, 2015).

La implementación de los sistemas de gestión ambiental a nivel empresarial permite certificarse en normas como *Florverde Sustainable Flowers (FSF)*, la cual es una certificación estratégica que busca que el sector floricultor sea competitivo, sostenible, comprometido con el medio ambiente y responsable con la sociedad. La certificación FSF cuenta con 190 requisitos dentro los cuales se encuentra el establecimiento del sistema de gestión, el uso racional del agua, los planes de fertilización y la eficiencia energética entre otros aspectos. La implantación de un sistema de gestión ambiental y la certificación FSF no solo le asegura a una organización entrar en el campo de las exportaciones y trabajar con multinacionales de gran prestigio, sino que también garantiza que un sistema productivo tenga mayor eficiencia, capacidad de producción y mayor reducción del aporte contaminante al ambiente (Bogotá Roncancio, 2017).

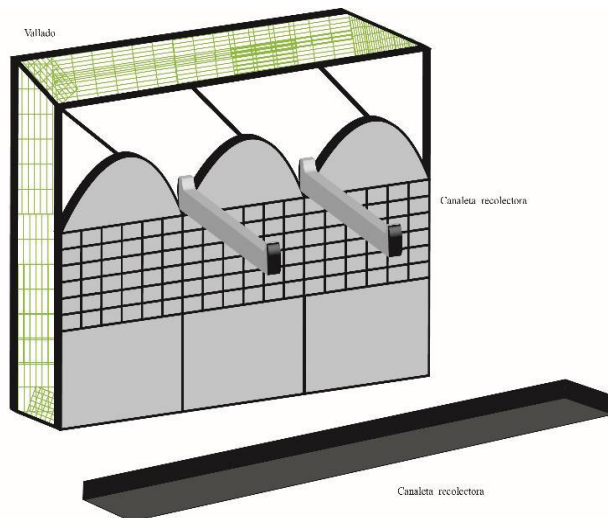
Estrategias de Aprovechamiento de Agua Para el Sector Floricultor

Acorde al panorama revisado en el sector floricultor y teniendo presente la disponibilidad de agua proveniente de la precipitación, se recomienda para esta actividad la aplicación de la técnica de cosecha de agua y la combinación de diferentes métodos que permitan no solo la contabilización del recurso realizando para cada caso particular el balance de agua por proceso, sino también la implementación de estrategias de reutilización del recurso. La técnica de aprovechamiento de agua lluvia, en la actualidad es usada tanto para satisfacer el consumo como para explotación industrial, evitando el agotamiento de las fuentes de agua subterráneas y superficiales, debido a que en la práctica posibilita una recolección eficiente, un almacenamiento seguro y un uso racional del agua lluvia (Córdoba *et al.*, 2016).

Como estrategia de gestión ambiental se plantea que las empresas del sector floricultor inicialmente realicen el balance de agua para cada uno de los procesos acorde a las entradas, las salidas y las posibles áreas susceptibles de contar con procesos de recirculación y reutilización, esto les permitirá identificar cuáles son los requerimientos del cultivo acorde a los periodos climáticos y la oferta hídrica disponible. Una vez establecido el balance hídrico se sugiere diseñar, construir y administrar los reservorios de agua lluvia en sus instalaciones. Estos reservorios pueden generarse a través de infraestructura física o a partir del uso de tanques dispuestos en techos, terreno libre o enterrados acorde a la superficie libre que se tenga para estos. Estos reservorios pueden aumentar la capacidad de los reservorios naturales o artificiales con los que generalmente cuentan las empresas del sector floricultor. Por otro lado, se plantea el diseño y construcción de vallados como se puede observar en la **Figura 4**, los cuales son capaces de soportar los caudales máximos que generalmente se producen a causa de aguaceros fuertes. Se debe tener en consideración para la construcción y diseño de los vallados, contar con pendientes adecuadas que toleren la evacuación normal del agua lluvia (Agatón & Sayago, 2016).

En el caso de la implementación de los vallados, los lados deben poseer pendientes proporcionadas que no superen los 60° con el fin de evadir la erosión y el deterioro. Es recomendable permitir que la vegetación crezca a los lados y en el fondo de los vallados para disminuir las pérdidas de agua por infiltración, monitorear los reservorios y cuidar de que no llegue la erosión o la sedimentación a este (Montero & Quintero, 2015). La implementación de canaletas, tanto aéreas como terrestres, para la recolección y conducción de aguas lluvias debe responder a las características específicas del lugar y al espacio disponible. El diseño del sistema debe adaptarse a estas condiciones para maximizar su eficiencia. Asimismo, es fundamental establecer y ejecutar un programa de mantenimiento periódico que incluya la limpieza y revisión de canaletas, reservorios o tanques de almacenamiento, con el fin de asegurar el buen funcionamiento del sistema a lo largo del tiempo. Es necesario monitorear constantemente el nivel de los reservorios, especialmente durante los periodos de lluvia intensa, para prevenir desbordamientos y garantizar que tengan la capacidad suficiente para almacenar el volumen de agua esperado. De igual manera, se debe evitar el agotamiento del recurso, asegurando una gestión equilibrada entre captación, almacenamiento y uso del agua recolectada.

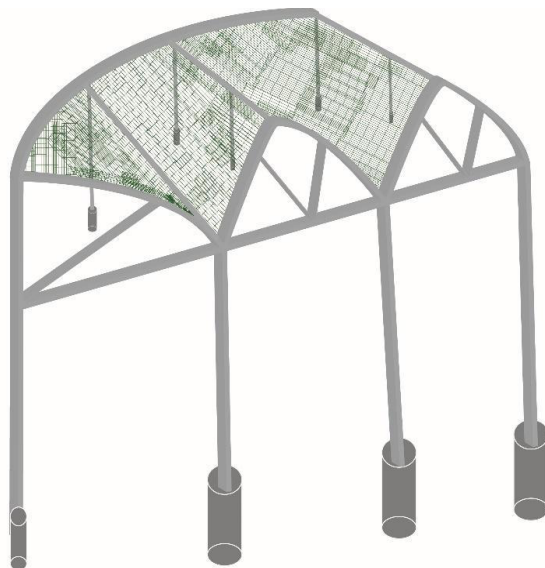
Figura 4. Diseño de vallado de recolección de agua lluvia



Fuente: Propia.

Adicional a la medida antes descrita, se recomienda que se implemente en los invernaderos la técnica de techo de malla (**Figura 5**) con el fin de aprovechar el riego de las plantas por medio del agua lluvia, si la especie y las condiciones del lugar así lo permiten (Montero Sánchez & Quintero Cardoso, 2015).

Figura 5. Diseño de invernadero con techo de malla



Fuente: Propia.

Para mejorar los consumos de agua se debe tomar en consideración la posibilidad de reutilizar el agua, en procesos como la lixiviación de los cultivos o excedentes de aguas de lavado e hidratación de la flor después de terminada la cosecha, con el fin que puedan ser usadas en los mismos o en otros procesos. Otra manera de optimizar el consumo es el reemplazar el agua concesionada desde el servicio de acueducto, por el agua recolectada en los invernaderos para llevar a cabo actividades como lavado de herramientas y funcionamiento de baños (Montero Sánchez & Quintero Cardoso, 2015).

Para ejecutar este proceso productivo se sugiere la implementación de una producción más limpia (Fonseca, 2017). Para este fin, es posible

usar los siguientes recursos: i) realizar una evaluación tecnológica del sector, ii) inscribir el cultivo en un fondo de protección ambiental, iii) desarrollar capacitaciones para los trabajadores del cultivo enfatizadas en el aumento de la eficiencia del proceso productivo y reducción de la carga contaminante, iv) implementar acciones de monitoreo mediante indicadores, monitoreo de vertimientos, aprovechamiento de subproductos del proceso productivo, v) implementar un programa de cumplimiento de las normas ambientales, vi) llevar a cabo un plan de manejo integral de residuos sólidos especiales y reciclables, así como un programa de Ahorro y Uso Eficiente del Agua (*PUEA*), mediante la implementación del riego por goteo, además del cumplimiento de metas de planes quinquenales, e viii) implementar sistemas de control de calidad (Restrepo, 2016).

Los problemas ambientales de un sistema de producción se pueden solucionar mediante una producción más limpia que funciona de la mano de un sistema de gestión ambiental con el fin de reducir los impactos al ambiente y de optimizar los procesos. En la implementación de un sistema de gestión ambiental, la empresa o el proceso productivo, también se ve beneficiado económicamente, además de que las empresas ganan mayor fiabilidad en el campo en el que compitan.

Conclusiones

El agua lluvia es un recurso natural con alto potencial de aprovechamiento, especialmente en sistemas de riego agrícola como los del sector floricultor del Oriente Antioqueño. Su uso permite reducir la presión sobre las fuentes hídricas convencionales, promoviendo una producción más sostenible y resiliente frente a la variabilidad climática.

La captación de agua lluvia contribuye a mitigar los impactos ambientales asociados a la extracción de agua superficial, reduce los vertimientos, fomenta el ahorro hídrico y disminuye los costos operativos. Además, fortalece los sistemas de gestión ambiental existentes o facilita la creación de nuevos, promoviendo prácticas de producción más limpias y eficientes.

La implementación de sistemas de captación de agua lluvia no solo beneficia al medio ambiente, sino también a las comunidades locales. Mejora la calidad de vida de los trabajadores al reducir su exposición a contaminantes y genera oportunidades económicas. En regiones como el Oriente Antioqueño, con condiciones hidrometeorológicas favorables, este recurso no debería ser desaprovechado, ya que su uso es rentable, eficiente y ambientalmente responsable.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

86

- Acevedo, J. S. H., & Jiménez, E. E. C. (2016). Evaluación de la huella hídrica para la producción de miniclaveles Pigeon en flores de Serrezuela S. A. Universidad de La Salle, Ciencia Unisalle. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1413&context=ing_ambiental_sanitaria
- Agatón, A. L., Ruiz, J. C. C., & Sayago, U. F. C. (2016). Revisión del estado del arte en captación y aprovechamiento de aguas lluvias en zonas urbanas y aeropuertos. *Revista Tecnura*, 20(50), 141–153. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a10>
- Arboleda, N. (2016). Diagnóstico del sistema de aprovechamiento del agua lluvia en el consejo comunitario de la comunidad negra de Los Lagos, Buenaventura. *Revista Luna Azul*, 43, 28. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.3>
- Ardila, M. P. C. (2018). Gestión del agua para riego en prácticas de agricultura desde la complejidad ambiental. Fundación Universidad de América. <https://repository.uamerica.edu.co/server/api/core/bitstreams/2ca23716-2b39-4599-8764-b2781e1f364b/content>
- Arias, C., & Torres, G. J. (1990). Dinámica de la vegetación de las lomas del sur del Perú: Estacionalidad y productividad primaria. Caso: Lomas de Atiquipa (Arequipa). *Revista Zonas Áridas*, 6, 45–60.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2022). Servicios de agua y saneamiento en América Latina y el Caribe: Un panorama de las fuentes de datos y las brechas de información. <https://doi.org/10.18235/0004190>
- Banco Mundial. (2018, 24 de enero). Calendario del agua: De enero a diciembre sin agua. Banco Mundial. <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2018/01/24/de-enero-a-diciembre-sin-agua>

- Bocarejo, D. (2018). Gobernanza del agua: pensar desde las fluctuaciones, los enmarañamientos y políticas del día a día. *Revista de Estudios Sociales*, 63, 111–118. <https://doi.org/10.7440/res63.2018.09>
- Bocco, M. J. (2022). Semana Mundial del Agua: Foco en las Américas 2022. Banco Interamericano de Desarrollo. <https://blogs.iadb.org/agua/es/semana-mundial-del-agua-2022/>
- Bogotá Roncancio, R. A. (2017). Efectos de la certificación Florverde Sustainable Flowers en las empresas floricultoras afiliadas a Asocolflores. *Signos - Investigación en Sistemas de Gestión*, 8(1), 19–35. <https://doi.org/10.15332/s2145-1389.2016.0001.0>
- Bonilla, A. (2019). El cambio climático y la seguridad alimentaria: retos para Colombia. *Revista de Estudios Ambientales*, 15(2), 45–59.
- Briceño, J. C. (2015). Impacto de la variabilidad climática en los recursos hídricos del altiplano cundiboyacense. *Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 199–215. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.51183>
- Cabrera, L. F., & Rojas, H. (2016). Análisis de la eficiencia en el uso del agua en cultivos de flores en la Sabana de Bogotá. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 14(1), 87–102.
- Calderón, M. P. (2014). Escenarios de cambio climático para Colombia: tendencias y proyecciones. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).
- Camacho, A., & Ramírez, P. (2017). Gestión comunitaria del agua en contextos rurales: aprendizajes y desafíos. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 21(40), 95–112. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd21-40.gcar>
- Cárdenas, S., & López, M. (2018). Políticas públicas de agua en Colombia: análisis de coherencia y eficacia. *Revista de Políticas Públicas*, 10(2), 33–52.
- Carrillo, D. (2016). Los páramos colombianos: guardianes del agua. *Revista Gestión Ambiental*, 12(1), 15–22.

- Castro, R., & Vargas, J. (2019). Innovaciones en tecnologías de riego para la floricultura colombiana. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 13(2), 320–331. <https://doi.org/10.17584/rcch.2019v13i2.10247>
- Cepal. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Chaves, A., & Rincón, F. (2017). Disponibilidad y calidad del agua en Colombia: un análisis territorial. *Revista Ingeniería y Región*, 25(1), 67–84.
- Chirivi, J. (2019). Evaluación de prácticas de conservación de agua en fincas productoras de flores en Cundinamarca. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 7(1), 55–69.
- Clavijo, P., & Herrera, S. (2018). Estrategias de adaptación al cambio climático en comunidades rurales de Boyacá. *Revista Desarrollo y Sociedad*, 80, 101–128. <https://doi.org/10.13043/dys.80.4>
- Colmenares, L. (2015). El recurso hídrico en Colombia: diagnóstico y perspectivas. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 11(22), 9–30. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.11.22.1>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2017). Informe anual sobre el estado del recurso hídrico en Cundinamarca.
- Corte Constitucional de Colombia. (2016). Sentencia T-622/16: Reconocimiento del río Atrato como sujeto de derechos.
- Cruz, J., & Martínez, L. (2016). La gestión integral del recurso hídrico: retos para el desarrollo sostenible. *Revista Gestión y Ambiente*, 19(2), 45–62.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2018). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico en Colombia.
- Díaz, A., & González, P. (2017). Cambios en la disponibilidad de agua en la región andina: un enfoque ecosistémico. *Revista Ecológica*, 34(2), 76–89.

- Echavarría, J., & Nieto, C. (2019). Gobernanza del agua y conflictos socioambientales en Colombia. *Revista Ciencias Sociales*, 25(1), 87–105.
- Echavarría, K. (2018). Evaluación de sistemas de riego en cultivos de exportación: el caso de la floricultura. *Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola*, 11(1), 53–64.
- Espinosa, D. (2017). Impacto del cambio climático en la seguridad hídrica de Colombia. *Revista Perspectivas*, 22(2), 45–58.
- Federación Nacional de Floricultores de Colombia (Asocolflores). (2019). Informe anual de sostenibilidad del sector floricultor.
- Fernández, J. (2016). Escasez de agua y estrategias de adaptación en América Latina. *Revista Latinoamericana de Medio Ambiente*, 12(1), 33–49.
- Flórez, R., & Méndez, S. (2018). Evaluación del uso eficiente del agua en la floricultura colombiana. *Revista Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 16(2), 101–115.
- Forero, A. (2017). Políticas de adaptación al cambio climático en Colombia. *Revista Estudios Políticos*, 50, 65–88. <https://doi.org/10.17533/udea.espo.n50a04>
- Fundación Natura. (2018). Informe sobre el estado de los ecosistemas hídricos de Colombia.
- García, D., & Muñoz, L. (2016). Conservación del agua y eficiencia productiva en la floricultura. *Revista Ingeniería y Región*, 22(2), 55–70.
- García, J. A. (2017). Vulnerabilidad de los páramos frente al cambio climático. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 19(37), 33–48.
- García, M., & Pérez, L. (2018). Evaluación de impacto ambiental en sistemas de riego tecnificado. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 9(1), 22–38.

- Gómez, H., & Cárdenas, F. (2015). Estrategias de manejo sostenible del agua en la Sabana de Bogotá. *Revista Colombiana de Geografía*, 24(1), 57–73. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n1.47823>
- Gómez, J., & Ramírez, P. (2017). Políticas de gestión del recurso hídrico en Colombia: avances y limitaciones. *Revista de Políticas Públicas*, 11(1), 77–94.
- Gómez, S., & Suárez, J. (2019). Participación comunitaria en la gestión del agua: experiencias en municipios de Cundinamarca. *Revista Gestión y Ambiente*, 22(1), 55–73.
- González, A., & Rodríguez, D. (2018). Análisis de vulnerabilidad hídrica en zonas de alta montaña. *Revista Ecológica*, 35(1), 112–126.
- Gutiérrez, C., & Vargas, R. (2016). El agua como derecho fundamental en Colombia: un análisis jurídico. *Revista Derecho y Sociedad*, 20(38), 45–61.
- Hernández, A. (2017). Evaluación del impacto de la variabilidad climática en la producción agrícola. *Revista Agroalimentaria*, 23(44), 33–47.
- Hernández, M., & Pérez, C. (2018). Estrategias de adaptación comunitaria a la escasez de agua. *Revista Ciencias Sociales*, 26(2), 88–103.
- Herrera, F., & Prieto, J. (2019). Innovaciones tecnológicas en el uso eficiente del agua para la agricultura. *Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola*, 12(2), 150–163.
- IDEAM. (2015). Estudio nacional del agua. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2018). Proyecciones de cambio climático para Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Instituto Nacional de Salud (INS). (2017). Informe nacional de calidad del agua para consumo humano.

- Jiménez, D., & López, M. (2016). La gestión integrada de los recursos hídricos en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 24(2), 33–47.
- Jiménez, F., & Vargas, A. (2017). Impacto de la floricultura en los recursos hídricos. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 20(39), 67–82.
- Lagos, C., & Rodríguez, J. (2018). Evaluación de la huella hídrica en cultivos de flores en Antioquia. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 10(2), 98–115.
- Lara, G. (2016). Gobernanza del agua en Colombia: retos y oportunidades. *Revista Estudios Ambientales*, 18(1), 21–37.
- León, P., & Cifuentes, R. (2019). Políticas públicas y sostenibilidad del recurso hídrico en Colombia. *Revista de Políticas Públicas*, 12(2), 45–62.
- Linares, J., & Castro, H. (2017). Adaptación al cambio climático en comunidades rurales. *Revista Desarrollo Rural*, 9(1), 33–49.
- López, A., & Moreno, F. (2016). Conservación de fuentes hídricas en la región andina. *Revista Ecológica*, 33(2), 70–85.
- López, D., & Ramírez, M. (2018). Uso sostenible del agua en sistemas agrícolas. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(2), 202–215.
- López, P., & Torres, J. (2019). Evaluación de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas urbanas. *Revista Tecnura*, 23(58), 155–170. <https://doi.org/10.14483/22487638.14281>
- Martínez, C., & Hernández, J. (2017). Impacto de la agricultura en la disponibilidad de agua en Colombia. *Revista Agroalimentaria*, 22(43), 67–81.
- Martínez, F., & Rojas, L. (2018). Análisis de eficiencia hídrica en sistemas de riego tecnificado. *Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola*, 11(2), 88–102.
- Martínez, J., & Torres, H. (2019). Gobernanza ambiental y gestión del agua en Colombia. *Revista Ciencias Ambientales*, 27(1), 45–61.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2016). Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2018). Estrategia nacional de adaptación al cambio climático.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR). (2017). Informe sobre el uso del recurso hídrico en el sector agrícola colombiano.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2018). Informe nacional de agua potable y saneamiento básico.
- Molano, A., & Pérez, L. (2016). Impacto ambiental de la floricultura en la Sabana de Bogotá. *Revista de Ciencias Ambientales*, 8(2), 55–70.
- Moncada, H., & Rodríguez, F. (2017). Adaptación de la floricultura colombiana al cambio climático. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 11(1), 22–35.
- Montenegro, J. (2019). Retos de la gestión del agua en Colombia frente a la Agenda 2030. *Revista Desarrollo y Sociedad*, 82, 141–162. <https://doi.org/10.13043/dys.82.5>
- Morales, C., & Pérez, A. (2018). La gestión del recurso hídrico en la región del altiplano cundiboyacense. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 21(41), 88–104.
- Moreno, P., & Gutiérrez, J. (2017). Estrategias de mitigación de la huella hídrica en la floricultura. *Revista Ingeniería y Región*, 23(2), 56–70.
- Naranjo, D., & Vargas, L. (2019). Políticas de conservación del agua en Colombia. *Revista de Estudios Ambientales*, 19(2), 33–49.
- Naranjo, M., & Pérez, J. (2016). Variabilidad climática y sus efectos en los recursos hídricos. *Revista Ecológica*, 34(1), 65–79.
- Nieto, C., & Rodríguez, M. (2018). Gobernanza del agua en territorios indígenas. *Revista Colombiana de Antropología*, 54(1), 115–132. <https://doi.org/10.22380/2539472X.384>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Objetivos de Desarrollo Sostenible.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2016). El estado mundial de los recursos hídricos.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2017). Informe mundial sobre el agua y saneamiento.
- Orjuela, L., & Cárdenas, J. (2019). Estrategias de conservación de páramos en Colombia. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 22(42), 76–91.
- Pacheco, A., & Rivas, C. (2016). La escasez de agua en zonas rurales de Colombia. *Revista Ciencias Sociales*, 23(2), 33–47.
- Padilla, S., & Rojas, P. (2018). Innovaciones en la gestión integral del agua en zonas urbanas. *Revista Tecnura*, 22(57), 101–117. <https://doi.org/10.14483/22487638.13547>
- Parra, D., & Cifuentes, M. (2017). Participación ciudadana en la gestión del agua: experiencias locales en Colombia. *Revista de Políticas Públicas*, 9(2), 55–72.
- Pérez, C., & Morales, A. (2018). Evaluación del impacto de la floricultura en la calidad del agua. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 11(1), 34–49.
- Pérez, J., & Vargas, H. (2016). Estrategias de gestión comunitaria del recurso hídrico. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 18(36), 89–105.
- Pérez, L., & Gómez, F. (2019). El agua como recurso estratégico en Colombia. *Revista de Estudios Ambientales*, 20(1), 67–83.
- Pineda, M., & Torres, L. (2017). Uso eficiente del agua en sistemas de riego. *Revista Ingeniería y Región*, 21(1), 44–58.
- Prieto, J., & Herrera, P. (2016). Adaptación de sistemas agrícolas a la escasez de agua. *Revista Agroalimentaria*, 21(41), 55–70.
- Ramírez, C., & Vargas, F. (2018). Impactos del cambio climático en la seguridad hídrica de Colombia. *Revista Ecológica*, 36(2), 101–116.

- Ramírez, H., & Suárez, L. (2017). Gobernanza ambiental y políticas de agua en Colombia. *Revista de Políticas Públicas*, 10(1), 23–40.
- Ríos, A., & Gutiérrez, J. (2016). Gestión del agua y sostenibilidad en la región andina. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 19(37), 71–86.
- Roa, S., & Martínez, D. (2019). Estrategias de adaptación hídrica en comunidades vulnerables. *Revista Ciencias Sociales*, 27(2), 112–127.
- Rodríguez, F., & Jiménez, A. (2017). La huella hídrica en la producción de flores en Colombia. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 10(2), 145–159.
- Rodríguez, M., & Cárdenas, L. (2016). Políticas de agua en Colombia: un análisis crítico. *Revista Estudios Ambientales*, 17(2), 99–115.
- Rodríguez, P., & López, J. (2018). Innovaciones tecnológicas en el manejo del agua para la agricultura. *Revista Colombiana de Ingeniería Agrícola*, 12(1), 67–82.
- Rojas, H., & Martínez, F. (2019). Evaluación de sistemas de captación de aguas lluvias en zonas rurales. *Revista Tecnura*, 23(59), 133–149. <https://doi.org/10.14483/22487638.14511>
- Rojas, L., & Pardo, S. (2016). Estrategias de mitigación del cambio climático en el sector agrícola. *Revista Agroalimentaria*, 22(42), 61–75.
- Ruiz, J., & Díaz, A. (2017). Conservación del recurso hídrico en ecosistemas de páramo. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 20(39), 55–70.
- Sánchez, D., & González, C. (2018). Análisis de políticas de agua potable y saneamiento en Colombia. *Revista de Políticas Públicas*, 11(2), 77–93.
- Suárez, P., & Gamboa, R. (2019). Estrategias de adaptación al cambio climático en comunidades rurales. *Revista Desarrollo y Sociedad*, 83, 123–140. <https://doi.org/10.13043/dys.83.4>

- Torres, J., & García, M. (2016). Manejo sostenible del agua en la Sabana de Bogotá. *Revista Colombiana de Geografía*, 25(2), 99–114. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v25n2.59991>
- Vargas, A., & Romero, P. (2018). Evaluación de impactos ambientales del riego en la floricultura. *Revista Colombiana de Ciencias Ambientales*, 12(1), 55–71.



Capítulo

4

Evaluación de la eficiencia de remoción de nitrógeno para desnitrificación usando metano como fuente de carbono

**Anngie K. Molina-Macías^a,
Yudy Andrea Londoño^a,
Gustavo A. Peñuela^a.**

^aUniversidad de Antioquia. Facultad de Ingeniería. Grupo
Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON),
Medellín, Colombia.

Resumen

El proceso de desnitrificación con oxidación de metano (*DOM*) es un proceso biológico que realiza la reducción de nitrito y nitrato a nitrógeno gaseoso mientras utiliza metano como fuente de carbono, lo que es atractivo para el tratamiento de las aguas residuales ya que permite disminución en la emisión de gases de efecto invernadero y en las descargas de nitrógeno a los cuerpos de agua. Sin embargo, aún es necesario evaluar el comportamiento de este tipo de procesos aplicado en flujos continuos, que permitan posteriormente un escalamiento de los sistemas. En este trabajo se evaluó el comportamiento en la remoción de nitrógeno de un reactor de flujo ascendente de lecho fijo (UFBR) implementado para realizar el proceso *DOM* bajo condiciones limitadas de oxígeno. Para ello se llevaron a cabo ensayos en discontinuo, en los que se aplicó una concentración inicial conocida de nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-), se saturó el medio con metano disuelto para proveer la fuente de carbono y se evaluó la remoción de nitrógeno durante 30 horas. Se logró evidenciar una remoción de estos compuestos después de 20 horas de reacción, obteniendo eficiencias de remoción de NO_2^- y NO_3^- del $88.3 \pm 5.5 \%$ y $98.6 \pm 0.9 \%$, respectivamente.

Introducción

El exceso de nutrientes que se descargan a los cuerpos de agua debido a la inadecuada disposición de las aguas residuales puede llevarlos a condiciones de eutrofización, ocasionando crecimiento excesivo de algas, disminución de las concentraciones de oxígeno disuelto, disminución del pH y toxicidad de las aguas (von Sperling & de Lemos Chernicharo, 2005). Esto hace que sea necesario que las plantas de tratamiento de aguas residuales no solo se enfoquen en la remoción de la materia orgánica y los sólidos del agua, sino también en la remoción de nutrientes e incluyan unidades destinadas para ello. Por otro lado, los procesos más comunes para el tratamiento de aguas residuales son los procesos de digestión anaerobia, los cuales son responsables de aproximadamente el 5% al 9% de las emisiones de metano a la atmósfera, contribuyendo al forzamiento radiactivo que genera el cambio climático global (El-Fadel & Massoud, 2001; GMI, 2010), sin tener en cuenta la proporción de metano disuelto que queda en los efluentes y puede ser liberada posteriormente en las descargas de aguas residuales tratadas. Esto hace que sea imperativo la implementación de sistemas de tratamiento más sostenibles, con los cuales se logre tanto la remoción de los contaminantes mayoritarios de las aguas residuales, como materia orgánica y sólidos suspendidos, y también la remoción de los nutrientes, permitiendo al mismo tiempo disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero.

El proceso de desnitrificación con oxidación de metano (*DOM*) es un proceso biológico en el cual participan microorganismos que usan el metano como fuente de carbono para la reducción de nitrito y nitrato a nitrógeno gaseoso <Davies, 1973; Ettwig *et al.*, 2008; Haroon *et al.*, 2013; Islas-Lima *et al.*, 2004; Sollo *et al.*, 1976; Thalasso *et al.*, 1997), lo que ha hecho que este proceso haya ganado atención ya que, además de permitir el descubrimiento de nuevas especies microbianas que vinculan los ciclos del carbono y del nitrógeno (Shen *et al.*, 2012), puede

llevar a la reducción de las emisiones de metano y de las descargas de nitrógeno por medio de la aplicación un único proceso biológico para el tratamiento de aguas residuales (Ren *et al.*, 2020). Debido a que el proceso *DOM* permite abordar estas dos problemáticas, recientemente los estudios que apliquen este proceso hacia el tratamiento de las aguas residuales han estado ganando importancia, especialmente aquellos enfocados en la evaluación de la eficiencia del proceso. Sin embargo, a pesar de las ventajas que se presentan en la aplicación del proceso *DOM* al tratamiento de aguas residuales, este no ha sido llevado aún a escala real.

Los principales aspectos que han dificultado la implementación del proceso *DOM* a escala real están relacionados con los largos tiempos requeridos para la estabilización de la biomasa y las dificultades de la operación en continuo. Llegándose a reportar tiempos de estabilización de la biomasa de hasta 600 días (W. Li *et al.*, 2018), y eficiencias de remoción de nitrito (NO_2^-) y nitrato (NO_3^-) no mayores al 60% en reactores con operación en continuo (Siniscalchi *et al.*, 2015). Esto demuestra la necesidad de profundizar en estudios que permitan ahondar en el conocimiento a cerca del funcionamiento del proceso, especialmente aquellos que se enfoquen en comprender los requerimientos operacionales para la aplicación del proceso en el tratamiento de las aguas residuales, y la evaluación de sus eficiencias y tasas de remoción. Por esto, el objetivo de este estudio fue evaluar el rendimiento de un reactor anaerobio de lecho fluidizado de flujo ascendente (*UFBR*), en la remoción de NO_2^- y NO_3^- , por medio del proceso de desnitrificación usando únicamente metano disuelto como fuente de carbono, identificando el tiempo de reacción en el cual se logra la mayor remoción de nitrógeno.

Materiales y Métodos

- Inóculo

Los microorganismos que realizan el proceso *DOM* se pueden encontrar distribuidos naturalmente en una gran diversidad de ambientes, como sedimentos marinos y de embalses, suelos agrícolas y lodos anaerobios

(W. Li *et al.*, 2018). Por esta razón, para la preparación del inóculo se tomaron lodos anaerobios de un reactor UASB, sedimentos de un embalse y suelo agrícola de un cultivo de arroz y se llevaron a un reactor *UFBR*, donde se mezclaron con medio mineral enriquecido con nitrito de sodio (NaNO_2) y nitrato de sodio (NaNO_3) preparado de acuerdo con lo descrito por (Ettwig *et al.*, 2009) hasta llegar a un volumen de 4 L, adicionando NaHCO_3 para aumentar su capacidad buffer. Posteriormente se desplazó el oxígeno del medio mineral mediante el burbujeo de nitrógeno para garantizar condiciones anóxicas.

- Montaje Experimental y Condiciones Operacionales

El montaje experimental consistió en la implementación de un reactor de flujo ascendente con biomasa adherida a medios de soporte tipo biobolas, con un volumen efectivo de 4 L, con recirculación interna de caudal, al cual se le dosificó una mezcla de gases como fuente de carbono consistente en $95\%\text{CH}_4:5\%\text{CO}_2$, durante 15 minutos a una presión de 70 psi. El proceso de arranque y estabilización del reactor se llevó a cabo mediante una estrategia operacional que consistió en el aumento gradual de la concentración de nitrito y nitrato mientras se disminuía paulatinamente el tiempo de retención hidráulico (*TRH*) hasta lograr una operación con un *TRH* de 24 h, eficiencias de remoción de nitrito y nitrato constantes y superiores al 80%

- Evaluación de la tasa de remoción de nitrito y nitrato

Después de más de 290 días de operación del reactor *UFBR* (Molina-Macías *et al.*, 2021) se realizó la evaluación de la tasa de remoción de nitrito y nitrato. Para ello se realizaron ensayos en discontinuo, en los cuales se burbujeó la mezcla de gases durante 30 minutos a una presión de 70 psi y seguidamente se adicionó NaNO_2 y NaNO_3 a una concentración de 1000 mg/L cada uno, y se dejó operando el sistema durante 30 horas, únicamente con una recirculación interna a un caudal de 5.9 mL/min regulado por medio de una bomba peristáltica. Se tomaron muestras para análisis de NO_2^- y NO_3^- , en los tiempos 0 h, 0.75 h, 1.5 h, 2.5 h, 3.5 h, 5 h, 7 h, 9 h, 11 h, 14 h, 17 h, 20 h, 24 h y 30 h para

evidenciar el comportamiento del proceso de remoción de nitrógeno. La tasa de remoción de NO_2^- y NO_3^- se calculó teniendo en cuenta la diferencia de cargas volumétricas entre la muestra tomada en el tiempo 0 y la muestra tomada después de 24 horas.

Métodos Analíticos

Durante los ensayos en discontinuo se tomaron muestras de la recirculación interna del reactor antes y después de cada ensayo para garantizar y verificar la idoneidad de las condiciones ambientales. Los valores de pH, de potencial de óxido-reducción (*ORP*) y de oxígeno disuelto (*OD*) se determinaron de acuerdo a los métodos potenciométrico 4500-H+B, electrométrico 2580B y de sonda óptica 4500-OHG, respectivamente, del libro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al., 2017) y determinados por medio de un equipo multiparámetro HACH HQ40d. Los análisis de los aniones NO_2^- y NO_3^- se realizaron de acuerdo con el método 4110B del libro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al., 2017), por medio de un cromatógrafo iónico Dionex Integrion HPIC. Se realizaron análisis de carbono orgánico total (COT) por medio de combustión a alta temperatura de acuerdo al método 5310B del libro *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al., 2017). Los análisis se llevaron a cabo en las instalaciones del laboratorio GDCON de la Universidad de Antioquia, el cual se encuentra acreditado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (*IDEAM*) y por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (*ONAC*) bajo la norma ISO/IEC 17025:2017, para realizar estos análisis bajo estrictos estándares de calidad.

Resultados y Discusión

- Condiciones operativas

Para la realización de los ensayos se garantizaron las condiciones ambientales ideales en el reactor para un óptimo proceso *DOM*, evidenciadas en las bajas concentraciones de *OD* (Kampman et al.,

2018) y valores de *ORP* menores que 0 (Arias *et al.*, 2018), igualmente, el pH permaneció en el rango ideal (He *et al.*, 2013). En la Tabla 1 se presentan los valores promedios y las desviaciones estándar de los parámetros de pH, *OD* y *ORP* al inicio y al final de cada uno de los ensayos.

Tabla 5. Valores de los parámetros operativos durante los ensayos en discontinuo

Parámetro	Unidades	Inicial	Final
pH	--	7.2 ± 0.1	7.5 ± 0.1
O ₂	mg/L	0.3 ± 0.1	0.4 ± 0.2
ORP	mV	-44.6 ± 32.3	-84.9 ± 45.2
COT	mg/L	2.84 ± 0.61	--

Fuente: Propia.

Si bien se ha demostrado que el proceso de desnitrificación con oxidación metano también se puede llevar a cabo en ambientes anóxicos o con concentraciones de oxígeno altas e incluso en condiciones aerobias (Y. Li *et al.*, 2020), es recomendable evitar las variaciones importantes de *OD* ya que pueden llevar a la inhibición de la biomasa y pérdidas de eficiencias de remoción con una muy baja capacidad de recuperación (Luesken *et al.*, 2012). Se observa en la Tabla 1 que los valores de oxígeno disuelto y pH permanecieron estables durante la realización de los ensayos y que, junto con los valores de *ORP*, permiten indicar que se mantuvo un ambiente anóxico.

Los valores de *COT* muestran la cantidad de carbono orgánico disponible en el medio al inicio de cada ensayo, siendo este valor tan bajo se puede decir que, la única fuente de carbono orgánico ampliamente disponible para la biomasa, para el desarrollo de sus procesos metabólicos, es el metano suministrado mediante burbujeo.

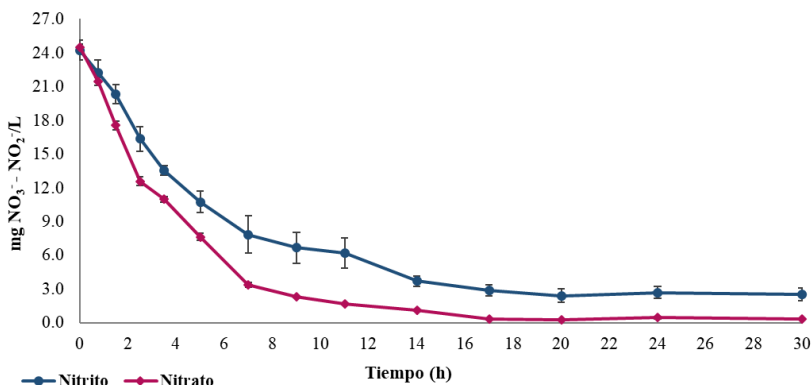
Reducción de Nitrógeno

Para evaluar el comportamiento de la reducción de nitrógeno de la biomasa cultivada en el reactor anaerobio, usando únicamente metano como fuente de carbono, se realizaron 3 ensayos en discontinuo con un TRH de 30 horas, cuya concentración inicial de NO₂⁻ y NO₃⁻ fue

de $24.2 \pm 3.9 \text{ mgNO}_2^-/\text{L}$ y $24.5 \pm 1.3 \text{ mgNO}_3^-/\text{L}$, respectivamente. El comportamiento de la reducción de nitrito y nitrato durante los ensayos en discontinuo de 30 horas se pueden observar en la Figura 1.

En el caso del nitrato, se observa que su concentración decae hasta una concentración de $0.3 \pm 0.1 \text{ mgNO}_3^-/\text{L}$ en tan solo 17 horas de reacción, resultando así en una eficiencia de remoción de nitrato de $98.6 \pm 0.9 \%$, que se mantuvo hasta finalizado el ensayo. Por otro lado, la concentración de nitrito disminuye hasta un valor estable después de 20 horas de reacción, con una concentración de $2.4 \pm 2.0 \text{ mgNO}_2^-/\text{L}$, y finalmente se obtuvo una eficiencia de remoción de nitrito de $88.3 \pm 5.5 \%$ al final de las 30 horas del ensayo.

gráfico 3. Concentración de nitrito y nitrato durante el tiempo de los ensayos



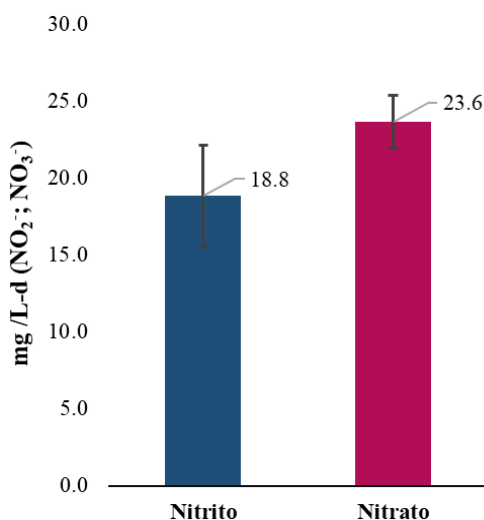
Fuente: Propia.

Las eficiencias de remoción obtenidas durante los ensayos en discontinuo son levemente más altos que los valores obtenidos durante el monitoreo del reactor anaerobio, sin embargo, se corresponden adecuadamente. El seguimiento de la concentración de nitrito y nitrato durante el tiempo de los ensayos permite observar el comportamiento de la reducción de estos compuestos, pudiendo evidenciar que un TRH de 24 h, e incluso entre 17h y 20 h, sería suficiente para lograr eficiencias de remoción superiores al 80% mediante el uso del reactor anaerobio y la biomasa obtenida durante el proceso previo de estabilización (Molina-Macías et al., 2021).

Tasas de Remoción

Para evidenciar de una mejor manera la capacidad de remoción de nitrógeno del reactor implementado se determinaron las cargas volumétricas de nitrito y nitrato removidos durante los ensayos en discontinuo, las cuales se muestran en la Figura 2. Para ello se tuvo en cuenta el TRH de 24 h y la diferencia de cargas entre la muestra inicial del ensayo, es decir, aquella tomada en el tiempo 0, y la muestra tomada a las 24 horas.

gráfico 4. Tasas de remoción de nitrito y nitrato obtenidas durante los ensayos en discontinuo



Fuente: Propia.

La tasa de remoción de nitrito y nitrato obtenidas durante los ensayos fueron de 18.8 ± 3.3 mg $\text{NO}_2^-/\text{L-d}$ y 23.6 ± 1.7 mg $\text{NO}_3^-/\text{L-d}$, respectivamente. En el caso de la tasa de remoción de nitrito, si bien este valor similar al reportado en otros estudios (He et al., 2015, 2016), también se han reportado tasas de remoción de nitrito de hasta 76.9 mg TN/L-d (Hu et al., 2014), valores mayores a las encontradas en el presente trabajo. No obstante, la tasa de remoción de nitrato es superior a la tasa de remoción de nitrato obtenida en un cultivo anaerobio de

más de 600 días de operación (W. Li et al., 2018). Sin embargo, es importante resaltar que el proceso de desnitrificación con oxidación de metano que se llevó a cabo en este estudio es realizado por grupos de microorganismos anóxicos como *Anaerolima* y *Methylocystis* (Molina-Macías et al., 2024), quienes son capaces de reducir el nitrito y nitrato y de oxidar el metano en condiciones anóxicas. A pesar de las diferencias en las condiciones ambientales, teniendo en cuenta que el cultivo del presente estudio tenía solo 290 días de operación al momento del estudio, esto representa una disminución significativa en el tiempo de estabilización, lo cual es importante para una futura implementación del proceso en escala piloto o escala real.

Conclusiones

El sistema implementado para la realización de un proceso de desnitrificación con oxidación anaerobia de metano resultó ser eficiente para la remoción de nitrito y nitrato en presencia de metano como única fuente de carbono, logrando eficiencias de remoción del 88.3% y 98.6% para nitrito y nitrato, respectivamente. Sin embargo, y a pesar de obtener una tasa de remoción de nitrato de 23.6 ± 1.7 mg $\text{NO}_3^-/\text{L-d}$, lo que es satisfactorio, es necesario continuar implementando acciones de mejora que permitan aumentar la tasa de remoción de nitrito, que permita llevar a la implementación de este tipo de sistemas a gran escala. Dentro de estas acciones se debe incluir la evaluación de la influencia del TRH en el proceso DOM, ya que se logró observar una rápida disminución de la concentración de nitritos y nitratos durante las primeras horas del ensayo y una estabilización de su concentración después de 17 horas. Este parámetro es importante en aras de un escalamiento de los procesos ya que influye directamente en el tamaño de los sistemas.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

- Arias, A., Alvarino, T., Allegue, T., Suárez, S., Garrido, J. M. & Omil, F. (2018). An innovative wastewater treatment technology based on UASB and IFAS for cost-efficient macro and micropollutant removal. *Journal of Hazardous Materials*, 359(March), 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.042>
- Baird, R. B., Eaton, A. D. & Rice, E. W. (Eds.). (2017). *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. Water Environment Federation.
- Davies, T. R. (1973). Isolation of bacteria capable of utilizing methane as a hydrogen donor in the process of denitrification. *Water Research*, 7(4), 575-579. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(73\)90056-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(73)90056-0)
- El-Fadel, M. & Massoud, M. (2001). Methane emissions from wastewater management. *Environmental Pollution*, 114(2), 177-185. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00222-0)
- Ettwig, K. F., Shima, S., Van De Pas-Schoonen, K. T., Kahnt, J., Medema, M. H., Op Den Camp, H. J. M., Jetten, M. S. M. & Strous, M. (2008). Denitrifying bacteria anaerobically oxidize methane in the absence of Archaea. *Environmental Microbiology*, 10(11), 3164-3173. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2008.01724.x>
- _____, Van Alen, T., Van De Pas-Schoonen, K. T., Jetten, M. S. M. & Strous, M. (2009). Enrichment and molecular detection of denitrifying methanotrophic bacteria of the NC10 phylum. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(11), 3656-3662. <https://doi.org/10.1128/AEM.00067-09>
- GMI. (2010). *Emisiones Mundiales de Metano y Oportunidades de Atenuación*. Global Methane Initiative.
- Haroon, M. F., Hu, S., Shi, Y., Imelfort, M., Keller, J., Hugenholtz, P., Yuan, Z. & Tyson, G. W. (2013). Anaerobic oxidation of

methane coupled to nitrate reduction in a novel archaeal lineage. *Nature*, 500(7464), 567-570. <https://doi.org/10.1038/nature12375>

He, Z., Cai, C., Geng, S., Lou, L., Xu, X., Zheng, P. & Hu, B. (2013). Modelling a nitrite-dependent anaerobic methane oxidation process: Parameters identification and model evaluation. *Bioresource Technology*, 147, 315-320. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.001>

_____, Geng, S., Pan, Y., Cai, C., Wang, J., Wang, L., Liu, S., Zheng, P., Xu, X. & Hu, B. (2015). Improvement of the trace metal composition of medium for nitrite-dependent anaerobic methane oxidation bacteria: Iron (II) and copper (II) make a difference. *Water Research*, 85, 235-243.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.040>

_____, Geng, S., Wang, L., Cai, C., Wang, J., Liu, J., Zheng, P., Xu, X. & Hu, B. (2016). Improvement of mineral nutrient concentrations and pH control for the nitrite-dependent anaerobic methane oxidation process. *Separation and Purification Technology*, 162, 148-153. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.02.016>

Hu, B., He, Z., Geng, S., Cai, C., Lou, L., Zheng, P. & Xu, X. (2014). Cultivation of nitrite-dependent anaerobic methane-oxidizing bacteria: Impact of reactor configuration. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 98(18), 7983-7991. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-5835-z>

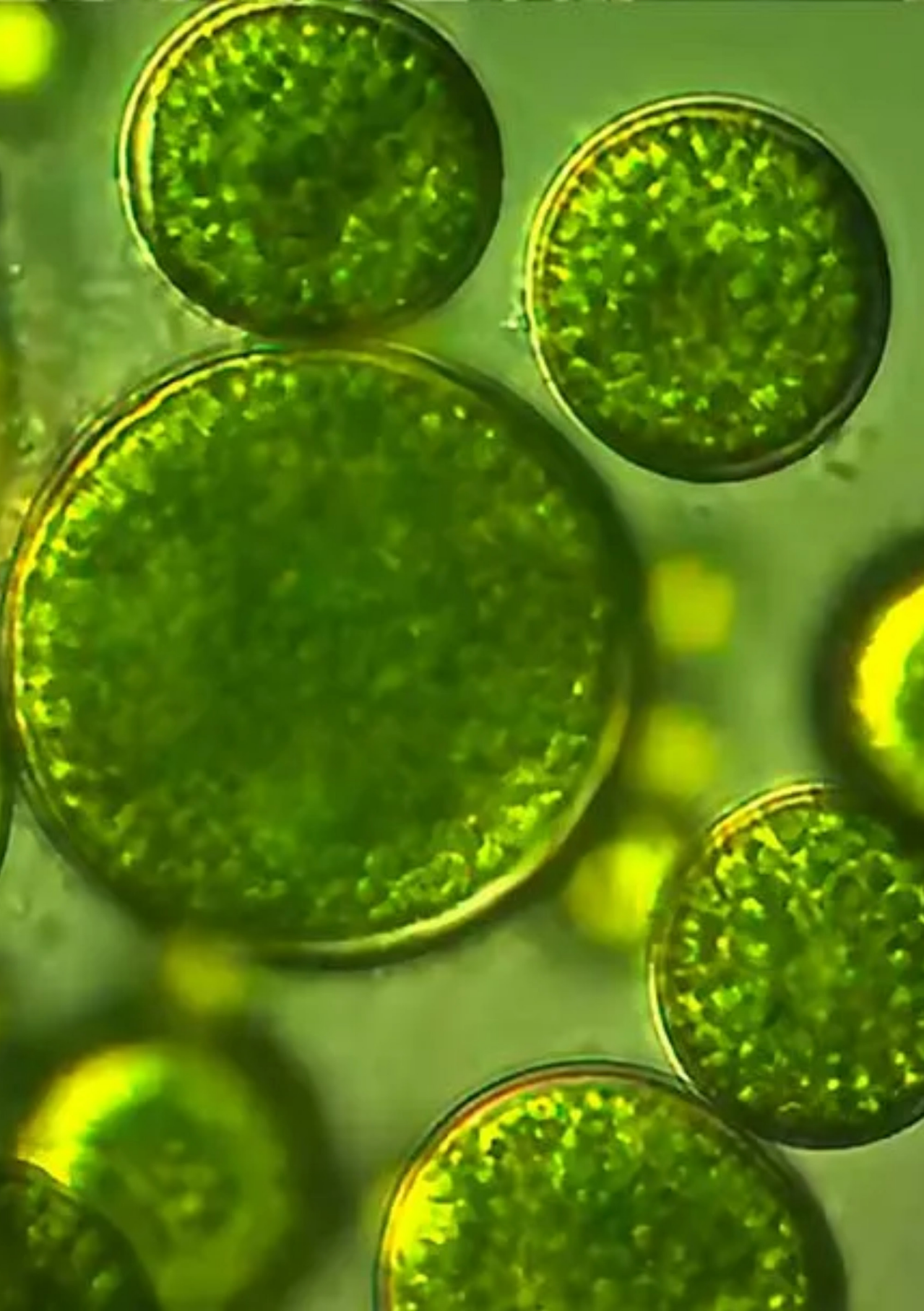
Islas-Lima, S., Thalasso, F. & Gómez-Hernandez, J. (2004). Evidence of anoxic methane oxidation coupled to denitrification. *Water Research*, 38(1), 13-16.

<https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.08.024>

Kampman, C., Piai, L., Temmink, H., Hendrickx, T. L. G., Zeeman, G. & Buisman, C. J. N. (2018). Effect of low concentrations of dissolved oxygen on the activity of denitrifying methanotrophic bacteria. *Water Science and Technology*, 77(11), 2589-2597. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.219>

- Li, W., Lu, P., Chai, F., Zhang, L., Han, X. & Zhang, D. (2018). Long-term nitrate removal through methane-dependent denitrification microorganisms in sequencing batch reactors fed with only nitrate and methane. *AMB Express*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s13568-018-0637-9>
- Li, Y., Wang, J., Hua, M., Yao, X., Zhao, Y., Hu, J., Xi, C. & Hu, B. (2020). Strategy for denitrifying anaerobic methane-oxidizing bacteria growing under the oxygen-present condition. *Science of The Total Environment*, 742, 140476. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140476>
- Luesken, F. A., Wu, M. L., Op den Camp, H. J. M., Keltjens, J. T., Stunnenberg, H., Francoijs, K. J., Strous, M. & Jetten, M. S. M. (2012). Effect of oxygen on the anaerobic methanotroph «Candidatus Methyloirabilis oxyfera»: Kinetic and transcriptional analysis. *Environmental Microbiology*, 14(4), 1024-1034. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2011.02682.x>
- Molina-Macías, A. K., Aristizábal, M. E., Londoño, Y. A. & Peñuela, G. A. (2021). Arranque y Estabilización de un Reactor Anaerobio para Desnitrificación Usando Metano Como Fuente de Carbono. En C. Gómez García & B. Viñet Hernandez (Eds.), *X Congreso de Gestión Ambiental—XIII Convención Internacional Sobre Medio Ambiente y Desarrollo* (pp. 39-46). Sello Editorial Ama.
- Molina-Macías, A. K., Londoño, Y. A., Pino, N. & Peñuela, G. A. (2024). Implementation of an Upflow Fixed Bed Bioreactor for Denitrification Coupled to Methane Oxidation: Performance and Biomass Development Under Anoxic Conditions. *Water, Air, & Soil Pollution*, 235(12), 765. <https://doi.org/10.1007/s11270-024-07555-x>
- Ren, Y., Hao Ngo, H., Guo, W., Wang, D., Peng, L., Ni, B. J., Wei, W. & Liu, Y. (2020). New perspectives on microbial communities and biological nitrogen removal processes in wastewater treatment systems. *Bioresource Technology*, 297, 122491. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122491>

- Shen, L. D., He, Z. F., Zhu, Q., Chen, D. Q., Lou, L. P., Xu, X. Y., Zheng, P. & Hu, B. L. (2012). Microbiology, ecology, and application of the nitrite-dependent anaerobic methane oxidation process. *Frontiers in Microbiology*, 3, 1-5. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00269>
- Siniscalchi, L. A. B., Vale, I. C., Dell'Isola, J., Chernicharo, C. A. & Calabria Araujo, J. (2015). Enrichment and activity of methanotrophic microorganisms from municipal wastewater sludge. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 36(12), 1563-1575. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.997298>
- Sollo, F. W., Mueller, H. F. & Larson, T. E. (1976). Denitrification of wastewater effluents with methane. *Water Pollution Control Federation*, 48(7), 1840-1842.
- Thalasso, F., Vallecillo, A., García-Encina, P. & Fdz-Polanco, M. (1997). The Use of Methane as a Sole Carbon Source for Wastewater Denitrification. *Water Research*, 31(1), 55-60. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(96\)00228-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(96)00228-X)
- Von Sperling, M. & de Lemos Chernicharo, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. Volume One.*



Capítulo 5

Uso de la *microalga* *Chlorella vulgaris* para la degradación de contaminantes persistentes en medios acuáticos

**Paula Moreno^a, Karina González^a y
Lina Patricia Vega Garzón^{b,c}**

^a Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería
Ambiental. Semillero Calidad y Tecnologías ambientales,
Tunja, Colombia.

^b Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia,
Grupo de investigación GIGA, Tunja, Colombia

^c Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería
Ambiental. Grupo de investigación GICAN, Tunja,
Colombia

Resumen

Este estudio se enfoca en el potencial de la bioabsorción de microalgas, específicamente de la especie *Chlorella vulgaris*, para remover colorantes e insecticidas en solución acuosa. La metodología incluyó la producción de microalgas mediante distintos métodos con la adición de dióxido de carbono (CO_2). Se analizó la remoción de rojo de metilo (RM) y el pesticida Fentopen®, midiendo turbidez, absorbancia y el crecimiento de las microalgas. Los resultados muestran un crecimiento óptimo mediante la adición de nitrógeno, fósforo y potasio y CO_2 . Se encontró que las microalgas remueven el RM hasta en un 50,3 %, mientras que la eficiencia en la absorción del pesticida Fentopen® es menor, con un máximo de 39,67%. A mayor concentración del insecticida aumenta la remoción, pero la variación en la cantidad de nutrientes aportados no influye en la misma. Se concluye que la especie *Chlorella vulgaris* es una especie prometedora para remover RM, realizando ajustes a las condiciones de proceso. El uso de un nutriente con nitrógeno, fósforo y potasio y otros micronutrientes fue más efectivo que utilizar una mezcla de nutrientes específicos. La introducción de CO_2 demostró ser esencial para el crecimiento de las microalgas, y para la remoción de los contaminantes.

Palabras clave: *Microalgas, Chlorella vulgaris, Biorremediación, Contaminantes persistentes.*

Planteamiento Del Problema y Antecedentes

Las microalgas son microorganismos autótrofos o heterótrofos unicelulares conocidos principalmente por ser eficientes en la fijación del CO₂ y en la utilización de energía solar para producir biomasa a mayor escala en comparación con otras plantas de mayor tamaño (González, 2015). Actualmente, este tipo de microorganismos son una alternativa importante para el desarrollo de nuevas técnicas de remediación de ambientes contaminados, ya que al ser organismos vivos que demandan gran número de nutrientes, son capaces de extraer los materiales dañinos del ambiente, consumirlos y degradarlos para finalmente generar compuestos más fáciles de tratar por otros medios (Forero, 2014).

Uno de los ejemplos más claros es la biosorción, la cual incluye entre otros procesos la adsorción de metales pesados presentes en el ambiente por medio de algunos componentes celulares de los microorganismos debido a la atracción electrostática entre la carga positiva de los metales y la carga negativa de los grupos carboxilos, fosforilos y aminos presentes en las paredes celulares de microalgas, hongos, bacterias y algunas plantas (Covarrubias *et al.*, 2015).

Dichos contaminantes generalmente provienen de la acumulación de sustancias químicas que componen los agroquímicos utilizados en el cuidado de la mayoría de cultivos, como es el caso de los pesticidas pues, según (Guerrero, 2018) muchos de los agricultores usan constantemente plaguicidas, herbicidas y fertilizantes que, a pesar de proteger y mejorar la producción de alimentos, también se acumulan en los suelos, haciendo que los compuestos que no lograron consumir las plantas o las sustancias degradadas por ellas mismas representan un gran riesgo para la salud ambiental ya que no solo son sustancias

fijas que permanecen en el suelo; sino que también son sustancias que por escorrentía pueden llegar a afluentes de agua o incluso permanecer en los alimentos que consumen los seres vivos, representando un gran peligro para la salud humana, animal y ambiental (Castillo *et al.*, 2020).

El tratamiento de aguas aprovecha la capacidad de ciertas especies microalgales para adsorber, acumular o degradar compuestos colorantes sintéticos presentes en efluentes industriales, especialmente los provenientes de la industria textil. Las microalgas no solo contribuyen a la eliminación de contaminantes, sino que también permiten la recuperación de biomasa útil, generando un enfoque de economía circular en el tratamiento de aguas. Esta biotecnología promueve el desarrollo de sistemas de tratamiento más eficientes, con menor impacto ambiental y potencial para integrarse en estrategias de biorremediación avanzadas (Rawat *et al.*, 2011).

Sin embargo, para poder desarrollar cualquier técnica que implique el uso de microalgas, se requiere comenzar con el cultivo de las mismas, ya que inicialmente se debe analizar su crecimiento y concentración durante un periodo de tiempo limitado; y para ello hay que realizar un gran número de experimentos en los que se utilicen diferentes métodos de cultivo variando las concentraciones de nutrientes, la temperatura ambiente y demás factores influyentes en el crecimiento de estos seres vivos (Barros, 2021); para finalmente lograr el desarrollo principal de cualquier investigación relacionada.

Las investigaciones relacionadas con la aplicación de microalgas, en particular la especie *Chlorella vulgaris*, han demostrado su eficacia en diversas áreas de la remediación ambiental y tratamiento de aguas residuales. Estudios como el llevado a cabo por Rozas y Galván sobre la bioadsorción de arsénico utilizando *Chlorella vulgaris* resaltan la capacidad de estas microalgas para la remoción de contaminantes presentes en efluentes industriales (Rozas & Galvan, 2013). Esta capacidad no se limita únicamente a la bioadsorción, sino que se extiende a la biorremediación, como lo evidencia al trabajo que combina *Chlorella vulgaris* con procesos de degradación fotoquímica para tratar aguas residuales en una planta de tratamiento ubicada en Puebla, México (Solís, 2018).

La versatilidad de *Chlorella vulgaris* se manifiesta en su aplicación para la desalinización de agua salobre, donde, mediante adaptaciones específicas y el uso de fotobiorreactores, se ha explorado su capacidad para reducir la salinidad del agua, ofreciendo así una alternativa innovadora en el ámbito de la desalinización (Barahoei *et al.*, 2021). Asimismo, investigaciones como la llevada a cabo por Franco *et al.* han demostrado la capacidad de *Chlorella vulgaris* para eliminar nitrógeno y fósforo de aguas residuales reales, con concentraciones de biomasa significativas y una eficiente absorción de nutrientes en un corto periodo de tiempo (Franco *et al.*, 2017).

En este sentido, esta investigación se enfocó en explorar el potencial de la bioadsorción de microalgas, específicamente de *Chlorella vulgaris*, en la eliminación de colorantes e insecticidas, aportando así a la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles para mitigar los impactos nocivos de estos compuestos en el medio ambiente.

Metodología

Selección y cultivo de microalgas

Para la recolección de microalgas utilizadas en el desarrollo de este proyecto de investigación se adquirió de un cultivo de microalgas *Chlorella vulgaris* de un proveedor de alimentos en Bogotá, para especies acuáticas de acuarios.

Para este procedimiento se utilizaron 2 métodos diferentes con el fin de establecer cuál método era el más adecuado para fomentar el crecimiento de las microalgas en un espacio controlado. Para ello se utilizó un método basado en la adición de un fertilizante comercial con distintas concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), y otros micronutrientes y el método desarrollado por (Sánchez *et al.*, 2019)

Para el primer método se preparó una solución compuesta por agua con microalgas, agua destilada y fertilizante NPK en diferente concentración (al 0,1% y 0,05%). y se realizó una disolución 1:1 compuesta por la muestra de microalgas y agua destilada; y dependiendo de la

concentración requerida en cada disolución (0,1% o 0,05%) se agregó la cantidad necesaria de fertilizante *NPK* (Experimentos 1 y 2)

Para el segundo método, se utilizaron 2 mezclas distintas de nutrientes. En la primera, se mezclaron 185 ml de microalgas concentradas con 715 ml de agua destilada en biorreactores de 900 ml cada uno. Por otro lado, para la segunda proporción se utilizaron Erlenmeyer de 150 ml de capacidad en los que se realizó una disolución compuesta por 144,5 ml de agua destilada y 5,5 ml de microalgas concentradas recolectadas manualmente en el municipio de Combita (Experimentos 3 a y 3b). (Cf. tabla 1).

Tabla 6. Condiciones generales de los experimentos realizados

Experimento	Método de crecimiento
Experimento 1	Fertilizante al 0,1%
Experimento 2	Fertilizante al 0,05%
Experimento 3 a y 3b	Nutrientes específicos

Fuente: Propia.

Las proporciones utilizadas en los experimentos 3 a y 3b se presentan en la *tabla 2*:

Tabla 7. Proporción de nutrientes utilizados de acuerdo con lo propuesto por (Sánchez et al., 2019)

Nutrientes	Cantidad para 900 ml (g) (Experimento 3a)	Cantidad para 150 ml (g) (Experimento 3b)
Cloruro de potasio (Scharlau)	0,61	0,038
Sulfato de magnesio al 99.5% (ISO LAB)	0,5	0,083
Sulfato de hierro (II) (CDH)	0,018	0,003
Dihidrógeno fosfato de potasio (Scharlau)	0,24	0,039
Nitrato de potasio al 99% (Ioba Chemie pvt. Ltd.)	1,11	0,19

Fuente: propuesto por (Sánchez et al., 2019)

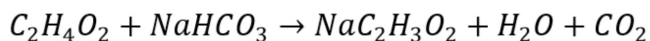
Cada uno de estos experimentos se realizó por duplicado.

- Medición de *pH* y absorbancia:

Se realizó seguimiento de la remoción de los contaminantes mediante espectrofotometría Vis, mediante un espectrofotómetro Macherey Nagel. Para ello se homogeneizó el contenido de cada biorreactor, y se determinó la absorbancia a ciertos periodos de tiempo, para hacer seguimiento de la remoción y del crecimiento de las micro algas. El pH fue medido con un multiparámetro Hanna HI 98194.

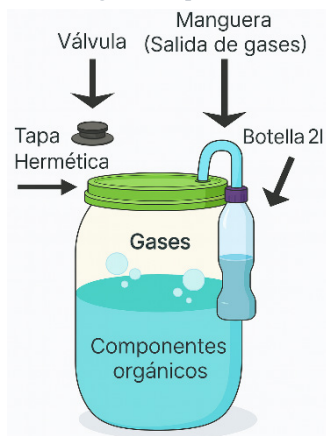
- Aporte de CO_2 al sistema del cultivo:

Se realizó aporte de CO_2 a los biorreactores a partir de la reacción de bicarbonato de sodio y ácido acético en la que se produce acetato de sodio, agua y dióxido de carbono, como se muestra en la siguiente ecuación (Marifé, 2015):



El montaje para realizar este aporte de CO_2 se muestra en la figura 1. Este procedimiento se realizó cada 15 días en cada biorreactor.

Ilustración 26. Diagrama explicativo del biorreactor



Fuente: Propia.

- Remoción de rojo de metilo:

Para este contaminante se hizo una curva de calibración de concentración versus absorbancia, y mediante un barrido en todo el espectro visible, se determinó como longitud de onda para la medición de la absorbancia, la de 520 nm (cf. Figura 2). Luego, se utilizaron 150 ml de solución de *RM* de concentración inicial de 0,1-0,15 mg/L y se agregaron 2 ml de pellet de microalgas previamente centrifugadas de los biorreactores de crecimiento, para hacer los experimentos de remoción. Estos se realizaron en 3 condiciones por duplicado, como se explica en la *tabla 3*:

Tabla 8. Condiciones experimentales para la remoción de RM

Experimento	Componentes
Experimento 4	Disolución de RM y pellet de microalgas
Experimento 5	Disolución de RM, pellet de microalgas y fertilizante NPK al 0,1%
Experimento 6	Disolución de RM, pellet de microalgas y nutrientes específicos

Fuente: Propia.

- Remoción del insecticida Fentopen:

Inicialmente se realizó el mismo procedimiento mencionado en el apartado anterior para determinar la absorbancia en una longitud de onda de 218 nm en diferentes concentraciones para desarrollar una curva de calibración con el fin de determinar la concentración con la que se realizaría la fase experimental.

Para esta parte experimental se realizaron 2 disoluciones con diferentes concentraciones de insecticida (al 0,5% y al 1%) y teniendo en cuenta que en la fase de crecimiento se concluyó que el crecimiento con fertilizantes *NPK* prosperó en menor tiempo, se decidió que en estos experimentos solo se utilizaría este fertilizante como fuente de alimento para la microalga *Chlorella vulgaris* tal como se explica en la *tabla 4*:

Tabla 9. Condiciones experimentales para la remoción de Fentopen®

Experimento	Componentes
Experimento 7	Disolución de Fentopen® al 0.5% y pellet de microalgas
Experimento 8	Disolución de Fentopen® al 1% y pellet de microalgas
Experimento 9	Disolución de Fentopen® al 0.5%, pellet de microalgas y fertilizante NPK al 0,1%
Experimento 10	Disolución de Fentopen® al 1%, pellet de microalgas y fertilizante NPK al 0,1%

Fuente: Propia.

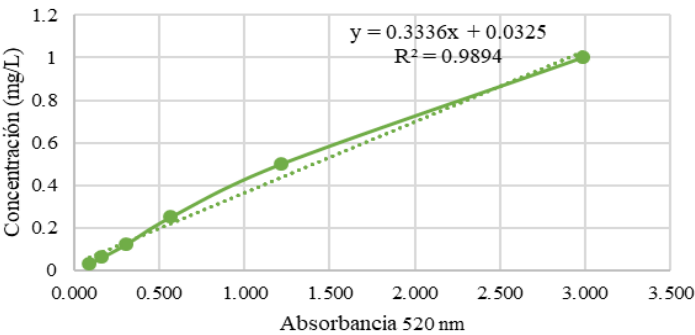
Se realizó la medición de absorbancia con una longitud de onda de 218 nm con un espectrofotómetro *UV Macherey Nagel*, para determinar la concentración del fertilizante, y la turbidez de la solución con el fin de determinar el crecimiento de las microalgas bajo estas condiciones en presencia del insecticida.

Resultados

- Curva de calibración del rojo de metilo

En la *figura 2* se presenta la curva de calibración de Absorbancia versus Concentración para el RM a 520 nm de longitud de onda.

gráfico 5. Absorbancia versus Concentración. RM

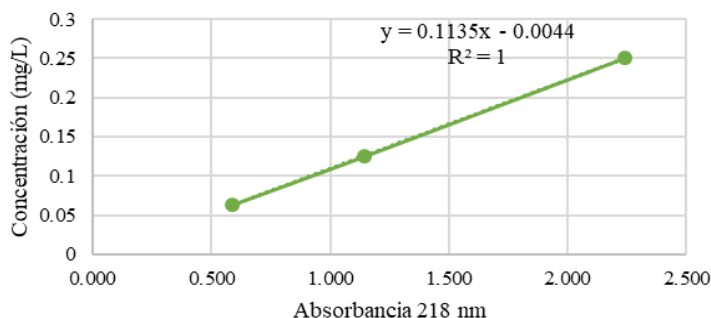


Fuente: Propia.

- Curva de calibración del insecticida *Fentopen*®:

Como se puede observar en la figura 3, la curva de calibración del insecticida *Fentopen*® presenta un comportamiento lineal a una longitud de onda de 218 nm, por lo que se utilizó esta técnica para conocer la concentración de este contaminante en solución acuosa.

gráfico 6. Curva de calibración del insecticida *Fentopen*

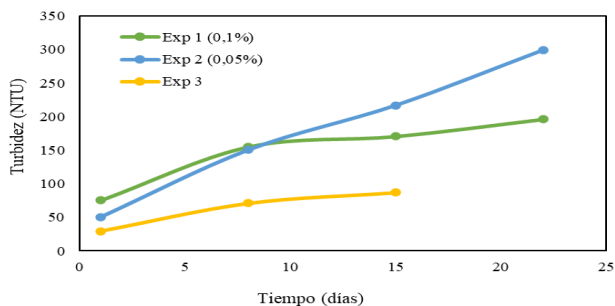


Fuente: Propia.

- Cultivo de la microalga *Chlorella vulgaris*:

Mediante las mediciones de turbidez de los cultivos de microalgas se pudo determinar el crecimiento de estas; así como midiendo la absorbancia de la solución a una longitud de onda de 680 nm. Los resultados se presentan en la figura 4:

gráfico 7. Crecimiento de la microalga *Chlorella vulgaris*



Fuente: Propia.

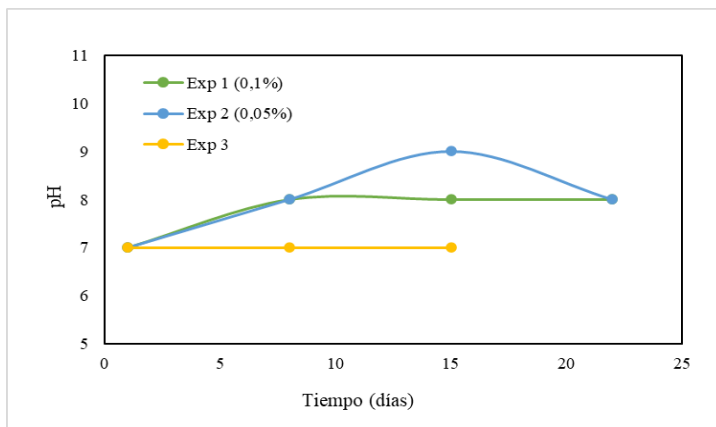
Como se pudo observar en la gráfica anterior, los dos experimentos donde se utilizó el fertilizante NPK (1 y 2) presentaron mayor crecimiento de las microalgas, que el experimento 3 de acuerdo al método de (Sánchez et al., 2019). Sin embargo, cabe aclarar que otro factor muy importante para este proceso fue el suministro de CO_2 , el cual ayuda al crecimiento de las microalgas.

Adicionalmente, el comportamiento de las microalgas alimentadas con fertilizante NPK (experimentos 1 y 2) muestra que la mejor concentración de este es la de 0,05% ya que esta concentración genera un patrón de crecimiento constante.

- Comportamiento del pH:

Se llevó un seguimiento del pH en los diferentes cultivos de microalgas y este mostró que al utilizar fertilizante *NPK* y alimentar de forma intermitente con CO_2 al sistema se obtuvieron condiciones adecuadas para el cultivo (Figura 5). Según Beltrán *et al.* (2017), el valor pH recomendado para microalgas con fines productivos oscila entre el 7 y 9, más específicamente en valores entre 8,2 y 8,7. mientras que, al observar el comportamiento de las microalgas alimentadas con nutrientes específicos, se puede observar que se mantiene neutro su valor pH, a pesar de que a este experimento también se le introdujo CO_2 al sistema, lo cual es inusual dado que según Beltrán et al., (2017) , el pH del agua usualmente cambia cuando las microalgas consumen nutrientes, absorben CO_2 y se reproducen, por lo que se podría decir que en este caso las microalgas pudieron necesitar más tiempo de incubación o una mayor concentración en cada nutriente utilizado.

gráfico 8. Monitoreo del valor pH de los cultivos de microalgas

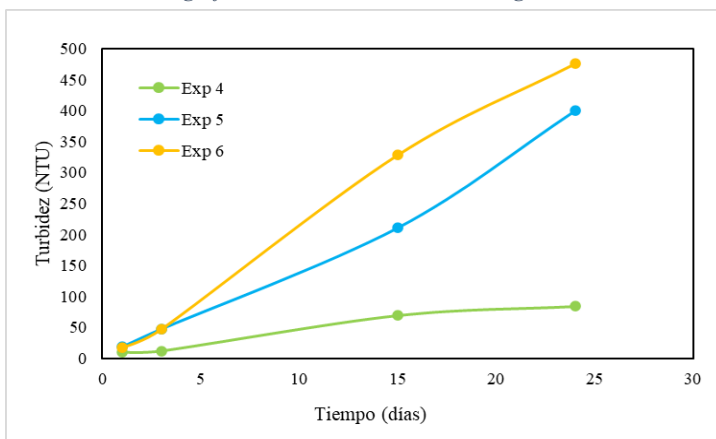


Fuente: Propia.

- Remoción de rojo de metilo:

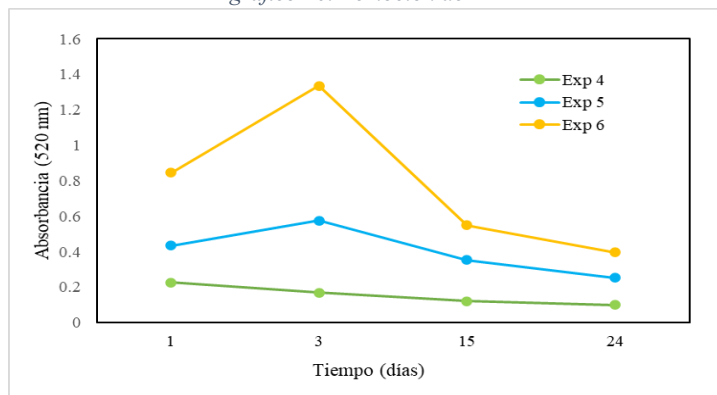
En la figura 6a se muestra el crecimiento de microalgas al estar en contacto con el RM, y en la figura 6 b la disminución de la concentración en solución de este:

gráfico 9. Crecimiento de microalgas



Fuente: Propia.

gráfico 10. Remoción de RM



Fuente: Propia.

Como se observa en la *figura 6*, hay un aumento significativo en la turbidez a lo largo del tiempo para todos los experimentos. Se puede observar que el experimento 6 tiene un aumento constante y sustancial en la turbidez a lo largo de los días, alcanzando un valor mucho más alto en el día 15 en comparación con las otras muestras. Este aumento de la turbidez se debe al crecimiento de las microalgas, mostrando que reaccionan de una manera positiva en su presencia en solución.

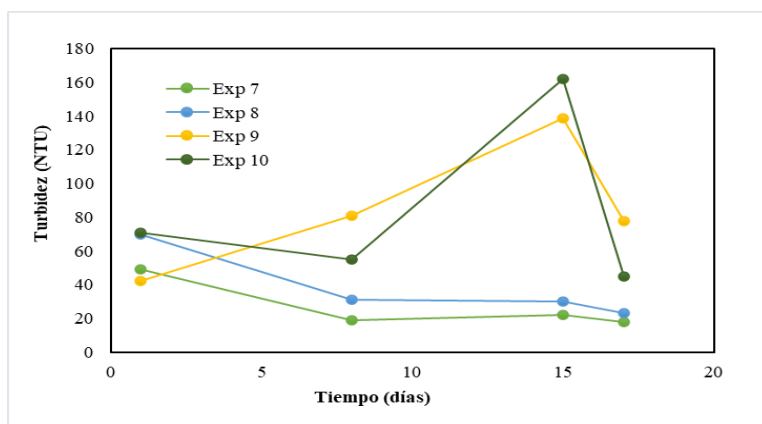
Por su parte la concentración de *RM* que se muestra en la *figura 7*, presenta una tendencia decreciente, aunque en el día 3 tuvo un aumento. Este se puede deber a reacciones químicas que se llevaron a cabo cuando los nutrientes específicos y el fertilizante entraron en contacto con el *RM*, dado que en el único caso en el que no se ve este resalto es en el experimento 4, el cual representa el comportamiento de microalgas que únicamente consumen *RM* sin adición de nutrientes. Adicionalmente, como se observa en el día 24, la menor concentración de *RM* también se da en el experimento 4, dado que contiene menor número de sustancias en su composición. Para el experimento 4 se obtuvo un porcentaje de remoción del 37,8%, el 5 del 19,5% y el 6 de 50,3%.

Por lo que se concluyó que el experimento 6, es decir el que contenía microalgas alimentadas con nutrientes específicos presentan una mejor absorción del colorante *RM* que el resto de los experimentos.

- Remoción de insecticida *Fentopen*®:

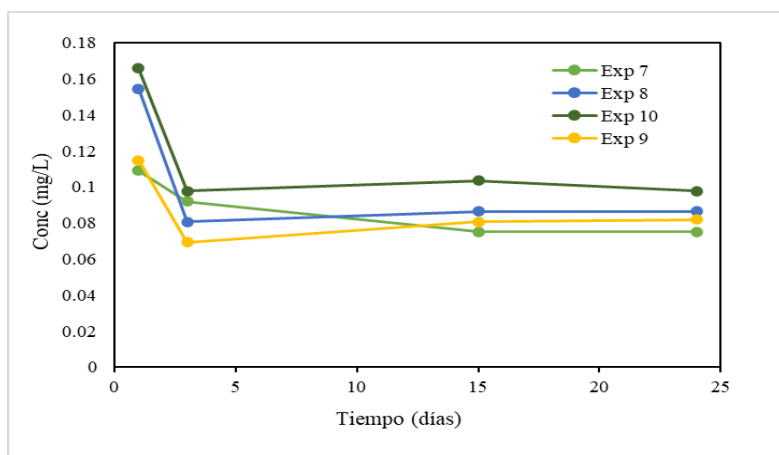
La figura 7 muestra en la parte a) el aumento del número de microalgas en la presencia de *Fentopen*® (a concentraciones de 0.5 y 1%), medida por medio de la turbidez. La parte b) muestra la remoción del pesticida bajo dichas condiciones.

gráfico 11. Crecimiento de microalgas



Fuente: Propia.

gráfico 12. Remoción del Fentofen



Fuente: Propia.

Como se puede apreciar en la *figura 8*, el crecimiento de las microalgas se ve afectado de distintas formas por el insecticida. En el caso de los experimentos que no contenían ningún nutriente adicional (experimentos 7 y 8), las microalgas disminuyen su concentración; mientras que los experimentos que cuentan con fertilizante *NPK* al 0.1% aumentan (experimentos 9 y 10); sin embargo, después del día 15 empiezan a reducir su número.

Cabe aclarar que en caso del experimento 10, al ser el experimento con mayor cantidad de insecticida *Fentopen®* y fertilizante *NPK*, presenta un comportamiento irregular debido a la etapa de adaptación de las microalgas a un ambiente “extremo” para luego iniciar a crecer exponencialmente de tal forma que alcanzan la mayor cantidad de microalgas en el día 15. Sin embargo, del día 15 al día 17 se presenta un descenso importante en la turbidez.

Por su parte, al observar la remoción de insecticida que es positiva en todos los casos se puede notar que inicialmente se observa una mayor remoción ya que hay mayor número de microalgas; y así mismo, a medida que el número de microalgas va disminuyendo empieza a haber un aumento en las concentraciones de insecticida. Por consiguiente, se requiere que las microalgas mantengan su crecimiento para lograr una buena remoción del contaminante. Los porcentajes de remoción fueron los siguientes: Experimento 7: 31,2%, experimento 8: 44,1%; experimento 9: 28,7%; y experimento 10: 41,1%. Como se puede observar, los experimentos que contenían niveles más altos de insecticida (al 1%) fueron los que presentaron mayor absorción del mismo (experimentos 8 y 10); mientras que en el caso de los experimentos que contenían una concentración de 0,5% presentan menor eficiencia de absorción de este contaminante. Lo que significa que así mismo como aumenta el nivel de concentración del insecticida, así mismo aumenta la eficiencia con la que las microalgas absorben la sustancia. Sin embargo, hay que tener en cuenta que en este caso la disponibilidad de nutrientes adicionales no influye en la absorción del *Fentopen®* ya que, como se puede observar de los porcentajes de remoción, el experimento 9 fue el de menor absorción a pesar de contener fertilizante *NPK* al 0,1%.

Esto se puede deber a que las microalgas presentan un comportamiento de *cometabolismo*, ya que según como lo explican (García & Peralta, 2008), ocurre cuando un microorganismo transforma un compuesto, llamado cosustrato, en presencia obligada de una sustancia durante el crecimiento en ausencia del sustrato de crecimiento, lo cual es parte fundamental de la eliminación biológica de compuestos xenobióticos en el ambiente que no necesariamente representan un interés directo para los microorganismos que lo degradan pero que aun así se benefician de la presencia de esta sustancia. Tal como en el caso del *RM*, ya que como se pudo observar, al haber más disponibilidad de sustancias, independientemente de ser un contaminante, fue absorbido en gran parte por las microalgas.

Conclusiones

En esta investigación se presenta el potencial de la microalga *Chlorella vulgaris* como un organismo prometedor en la remoción de colorantes como el rojo de metilo. Los resultados obtenidos revelan su notable capacidad para adaptarse al nuevo entorno, consumiendo en gran medida este compuesto contaminante. Asimismo, se destaca su habilidad para utilizar el rojo de metilo como fuente de nutrientes, promoviendo así su propio crecimiento.

Por otro lado, en el caso de la remoción del insecticida *Fentopen*®, se observó un porcentaje menor de efectividad. Esto indica la necesidad de reevaluar la metodología empleada y continuar con pruebas adicionales para mejorar la eficiencia en la absorción de contaminantes persistentes.

Es importante señalar que, en la fase de crecimiento de las microalgas, se ha determinado, hasta el momento, que el uso de fertilizante *NPK* es preferible a la utilización de nutrientes específicos. No obstante, se sugiere la exploración de diferentes concentraciones para eventualmente combinar ambos métodos en el futuro. Además, se resalta la importancia crucial de la introducción de CO_2 al sistema a través de biorreactores, dado que este factor resulta fundamental para incrementar la población de microalgas.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

129

- Barahoei, M., Sadegh Hatamipour, M., & Afsharzadeh, S. (2021). Direct brackish water desalination using *Chlorella vulgaris* microalgae. *Desalination*, 148, 1–10. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582020317973>
- Barros, J. (2021). Práctica de identificación y conteo de microalgas. Universidad del Magdalena, Facultad de Ingeniería Agronómica. <https://bloque10.unimagdalena.edu.co/identificacion-y-conteo-de-microalgas/>
- Beltrán, J., Guajardo, C., Barceló, I., & López, U. (2017). Biotratamiento de efluentes secundarios municipales utilizando microalgas: Efecto del pH, nutrientes (C, N y P) y enriquecimiento con CO₂. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(3), 413–424. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-19572017000300001
- Castillo, B., Ruiz, J., Manrique, M., & Pozo, C. (2020). Contaminación por plaguicidas agrícolas en los campos de cultivos en Cañete (Perú). *Revista Espacios*, 41(10), 11. <https://www.revistaespacios.com/a20v41n10/a20v41n10p11.pdf>
- Covarrubias, S., García, J., & Peña, J. (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25(NE-2), 40–45. https://www.actauniversitaria.ugto.mx/index.php/acta/article/view/907/pdf_96
- Forero, P. A. (2014). Fundamento teórico sobre tratamiento de aguas residuales por fitorremediación [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio UMNG.
- Franco, M., Rodríguez, M., Moreno, U., & Martínez, A. (2017). Tolerance and nutrients consumption of *Chlorella vulgaris* growing in mineral medium and real wastewater under laboratory conditions. *Open Agriculture*, 2(1), 394–400. <https://doi.org/10.1515/opag-2017-0042>

- García, M., & Peralta, M. (2008). Cometabolism in the biodegradation of hydrocarbons. *Mexican Journal of Chemical Engineering*, 7(1), 81–92. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1665-27382008000100001&script=sci_abstract
- González, A. (2015, octubre). ¿Qué son las microalgas? Interés y uso. Grupo Cooperativo Cajamar. <https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>
- Guerrero, A. (2018). Manejo de plaguicidas en cultivos de *Zea mays* L. “maíz” (Poaceae), *Brassica cretica* Lam. “brócoli” (Brassicaceae), *Apium graveolens* L. “apio”, *Coriandrum sativum* L. “cilantro” (Apiaceae), *Allium fistulosum* L. “cebolla china” (Amaryllidaceae) en la campiña de Moche, Trujillo, Perú. *Arnaldoa*, 25(1), 89–112. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2413-32992018000100010
- Marifé. (2015, noviembre 25). Experimentando con las reacciones químicas. *Ámbito científico del IES Selgas (Cudillero)*. <https://diverselgas.blogspot.com/2015/11/experimentando-con-las-reacciones.html?m=1>
- Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411–3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Rozas, H., & Galván, K. (2013). Remoción de arsénico de efluentes industriales, mediante bioadsorción con *Chlorella vulgaris* a escala de laboratorio [Manuscrito inédito]. Academia.edu. https://www.academia.edu/101236641/Remocion_De_Arsenico_De_Efluentes_Industriales_Mediante_Bioabsorcion_Con_Chlorella_Vulgaris_a_Escala_De_Laboratorio
- Sánchez, Y., Tobío, I., Díaz, Y., & Melo, E. (2019). Evaluation of the basic experimental conditions for the production of biomass from the microalgae *Chlorella vulgaris*. ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/332288972_Evaluacion_de_las_condiciones_experimentales_basicas_para_la_produccion_de_biomasa_a_partir_de_la_microalga_Chlorella_vulgaris

Solís, C. (2018). Application of *Chlorella vulgaris* in wastewater for reuse [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio Institucional BUAP. <https://repositorioinstitucional.buap.mx/items/87ba1e22-2212-4113-995d-5ab918fc4cdf>



Capítulo

6

Diseño y evaluación de un biofiltro para el tratamiento de aguas grises domésticas en la vereda Teguaneque, Turmequé (Boyacá)

**E. María Avellaneda D^a,
C. Andrés Atara M^a,
D. Gisell Cañón A^a,
Samuel A. Duarte M^a,
L. Gustavo Gaona G^a,
Karen Osorio N^a,
Michael J. Rodríguez C^a,
Valentina Vargas A^a,
D. Alejandra Vargas A^a.**

^a Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería
Ambiental Grupo GICAN. Tunja, Colombia

Resumen

En este artículo se presenta un estudio sobre la implementación de un biofiltro con el propósito de evaluar su eficiencia en el tratamiento de aguas grises para una unidad de vivienda rural dispersa en la vereda Teguanegue del municipio de Turmequé (Boyacá). El proceso dio inicio con una investigación exhaustiva sobre el estado actual del tratamiento de aguas residuales en la zona de estudio. A partir de esta investigación, se definió una metodología dividida en diferentes fases que permitió identificar la viabilidad de emplear este biofiltro como solución de tratamiento. Después de analizar el tema y revisar la información bibliográfica disponible, se seleccionó la planta fitorremediadora a utilizar, siendo el buchón de agua la elegida. Se llevó a cabo una caracterización del agua a tratar para determinar la composición del lecho filtrante adecuado para el tratamiento, así como el dimensionamiento. Una vez seleccionado el lecho filtrante, se procedió a la construcción del biofiltro y su puesta en funcionamiento para llevar a cabo la valoración de la eficiencia durante un periodo de ocho días. Tras analizar el proceso, se obtuvieron resultados positivos que indican la pertinencia del biofiltro en el tratamiento de aguas grises.

Introducción

135

El recurso hídrico es de vital importancia para el desarrollo de la vida humana y de las diferentes actividades que esta realiza, anualmente se presentan cifras alarmantes relacionadas con el vertimiento de las aguas sin ningún tipo de tratamiento, por lo cual, es necesario proponer soluciones que permitan la reducción de contaminantes y de este modo minimizar el impacto hacia el recurso hídrico. Es importante mencionar que en la actualidad en el departamento de Boyacá se presenta una gran problemática frente a la contaminación de las fuentes de agua como resultado de las diferentes actividades productivas que se desarrollan bien sean industriales, pecuarias, agrícolas, sin dejar de lado la carga que representa la ocupación doméstica.

Lo que ha ocasionado un aumento en el volumen de aguas residuales a tratar y deja en evidencia la incapacidad de tratamiento que existe debido a que no se dispone de un manejo eficiente del agua residual en muchos de los municipios del departamento, por lo que resulta en vertimientos puntuales a cuerpos de agua natural afectando la capacidad de autodepuración y por ende la calidad del recurso, lo que se relaciona en muchos de los casos con problemas de salubridad en las comunidades.

En Colombia la resolución 1256 de 2021 reglamenta el uso de las aguas residuales donde se explica la importancia de planificar el uso y aprovechamiento de los recursos naturales con el propósito de proteger, restaurar y conservar el recurso hídrico y así promover el desarrollo sostenible en el país (Minambiente, 2021). Según estadísticas dadas por el SISBEN para el año 2015 en el Departamento de Boyacá el manejo de aguas residuales para el área rural se encontraba en indicador rojo con

un registro de 58.559 viviendas que no contaban con un pozo séptico y en mayor porcentaje no contaban con ningún tipo de disposición para agua residual (Boyacá, 2019).

Con base en lo anterior, se expone la problemática actual del municipio de Turmequé en la vereda Teguanegue frente a la falta de sistemas de tratamiento para el agua residual en muchas de las viviendas puesto que no cuentan con un pozo séptico o algún sistema que permita tratar adecuadamente este recurso. El agua residual que sale de cada una de las viviendas se transporta a través de zanjas a varios metros de distancia ocasionando cúmulos de agua estancada, lo que se refleja en afectaciones a la salud de la comunidad y al ecosistema puesto que se presentan malos olores, propagación de insectos, contaminación de suelos, etc. El propósito del presente proyecto es presentar un tratamiento alternativo de aguas residuales que permita minimizar los impactos y dar un aprovechamiento a este residuo para convertirlo en un recurso.

Metodología

Con respecto al fundamento teórico, para el desarrollo del proyecto se plantearon las siguientes fases metodológicas:

- **Fase 1. Revisión Bibliográfica y Marco Teórico:** investigar sobre los conceptos de aguas grises, biofiltros y sistemas de tratamiento sostenible; y el estudio de casos similares de implementación de biofiltros para el tratamiento de aguas grises.
- **Fase 2. Definición del área de estudio:** realizar un estudio exhaustivo de las características socioambientales de la Vereda Teguanegue, incluyendo el clima, la topografía, el uso del suelo; a su vez, investigar las regulaciones locales y nacionales relacionadas con el tratamiento de aguas residuales y los permisos necesarios para implementar el proyecto.

- **Fase 3. Caracterización de la muestra de agua:** determinar las características fisicoquímicas del agua gris producida por la vivienda a fin de determinar las condiciones de tratamiento con las que debe cumplir el biofiltro. Las características para evaluadas fueron: pH, Turbidez, Oxígeno disuelto, Solidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Nitrógeno y Fósforo.
- **Fase 4. Diseño del Biofiltro:** esta fase va en línea con la fase anterior ya que según los parámetros obtenidos en las pruebas de laboratorio se definirán los materiales y su distribución estructural para la construcción del biofiltro. Estas pruebas ayudarán a definir la complejidad del lecho filtrante y las condiciones de supervivencia de las plantas fitorremediadoras.
- **Fase 5. Construcción del biofiltro:** es el ensamblaje del biofiltro siguiendo los parámetros de diseño previamente establecidos.
- **Fase 6. Evaluación de rendimiento:** consiste en realizar la caracterización de la muestra de agua antes y después de ser tratada por el biofiltro, con el fin de evaluar su eficiencia.

Análisis de Resultados

Conceptos

Agua residual y sus características: el agua residual está compuesta de componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos. Estas aguas provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias (Elizabeth Díaz Cuenca, 2012)

Las características de las aguas residuales son de gran importancia debido a que estas evidencian la composición física, química y biológica del recurso a analizar como se muestra a continuación:

Propiedades físicas: color, se ve relacionado con la degradación natural de la materia orgánica, por su parte el olor es característico del agua residual en descomposición.

Constituyentes químicos: orgánicos, carbohidratos con presencia de pesticidas de residuos agrícolas, fenoles por vertidos industriales, cloruros, metales pesados y aguas de escorrentía.

Constituyentes biológicos: contenido de alta gamma de microorganismos, que pueden ser patógenos y desencadenar un riesgo para la salud humana.

Tipos de Agua Residual

Las aguas generadas por actividades humanas pueden contener una variedad de sustancias que comprometen su calidad. Entre estas se encuentran químicos de uso doméstico, como jabones, detergentes y cosméticos, así como residuos sólidos como papel higiénico, plásticos y toallitas desechables. Además, es posible hallar metales pesados, como plomo, mercurio o zinc, y residuos orgánicos derivados de la materia fecal.

Según su origen, las aguas residuales se dividen en tres categorías principales:

Aguas residuales domésticas: estas se generan en áreas residenciales y de servicios, como resultado de las actividades cotidianas en el hogar.

Aguas residuales industriales: incluyen aquellas aguas empleadas en procesos industriales o comerciales, provenientes de fábricas, centros de producción, y actividades agrícolas o ganaderas.

Aguas residuales urbanas: estas consisten en una mezcla de aguas residuales domésticas y, en algunos casos, industriales, que se generan en entornos urbanos. (TELWASA, 2022)

Métodos de Tratamiento en Agua Residual

En la actualidad son varias las tendencias relacionadas con el tratamiento de aguas residuales, por ello estas se dividen en dos grupos: operaciones y procesos unitarios; en el que, para la primera, prevalece la aplicación de elementos físicos y en la segunda actividad química y/o biológica (Rojas R, 2002).

La clasificación de las etapas del tratamiento de aguas residuales y teniendo en cuenta la practicidad que se lleva a nivel Latinoamérica se presentan (BCN, 2018):

Pretratamiento: esta etapa consiste en eliminar de la manera más eficaz materiales que provocan problemas de mantenimiento y funcionamiento de la planta de tratamiento.

Tiene como propósito acondicionar las aguas residuales con la intención precisa de salvaguardar las instalaciones y el funcionamiento de las infraestructuras de tratamiento. Además, busca eliminar o disminuir considerablemente las condiciones no deseadas, principalmente aquellas asociadas con la apariencia visual desfavorable de las plantas de tratamiento.

Tratamiento Primario: es en esta etapa donde ocurre la eliminación de productos orgánicos e inorgánicos a través de procesos fisicoquímicos, no solo elimina los elementos molestos, sino también una proporción significativa de la carga orgánica. Esta carga orgánica puede representar del 25% al 40% de la DBO y del 50% al 65% de los sólidos suspendidos.

Tratamiento Secundario: se elimina materia orgánica disuelta mediante procesos biológicos. El objetivo del Tratamiento Secundario es finalizar el proceso de manera que se logre eliminar el 90% de los elementos contaminantes. Para este fin, se emplea un Tanque de Aireación que suministra grandes volúmenes de oxígeno a una mezcla compuesta por aguas residuales, bacterias y otros microorganismos. El oxígeno presente en el aire acelera el desarrollo de microorganismos beneficiosos que se alimentan de la materia orgánica perjudicial presente en el agua residual (Torres, 2022).

Tratamiento Terciario: esta etapa consiste en la remoción de materia orgánica y recalcitrantes, siendo estos últimos una sustancia cuya estructura es muy estable químicamente y que por ende se resisten al ataque de los microorganismos o de cualquier tipo de mecanismo de degradación (GobMexico, 2018).

Desinfección: consiste en la eliminación de microorganismos a través de procesos fisicoquímicos. Se utiliza para disminuir principalmente la concentración de bacterias, virus y quistes amebianos en las aguas residuales que han sido tratadas, antes de su liberación final. La desinfección implica la eliminación específica de los microorganismos patógenos.

Sistemas Convencionales de la Gestión de Agua Residual en Las Zonas Rurales

Actualmente, la creciente demanda de plantas de tratamiento de aguas residuales se ve principalmente impulsada por la necesidad de ampliar la cobertura en zonas rurales. Sin embargo, en estas áreas, los sistemas convencionales de gestión de aguas residuales tienden a depender de enfoques y tecnologías más simples. Esto se debe a la limitación de recursos disponibles y a la menor densidad de población en comparación con las zonas urbanas (Zurita - Martínez, 2011). Algunos de los sistemas de gestión y tratamiento de aguas residuales para zonas rurales son:

Fosas sépticas: son sistemas de tratamiento primario donde las aguas residuales se almacenan en un tanque hermético. Los sólidos más pesados se sedimentan en el fondo, mientras que los líquidos más claros se liberan gradualmente. Requieren mantenimiento regular para eliminar los lodos acumulados; cabe mencionar que la eficiencia de descontaminación depende de las características fisicoquímicas del efluente y de las dimensiones del tanque (Lucho - Constantino, 2015).

Sistemas de trinchera de absorción: estos sistemas permiten que las aguas residuales tratadas por una fosa séptica se filtren a través de un campo de tuberías enterradas y rodeadas de grava. El suelo actúa como un filtro natural antes de que el agua se infiltre en el subsuelo; estos sistemas complementan las fosas sépticas (Campo Usuga, 2022).

Lagunas de oxidación: son estanques con baja profundidad donde las aguas residuales se retienen durante un tiempo más prolongado, resultando que los procesos biológicos reduzcan la carga contaminante. Los microorganismos presentes en el agua descomponen los contaminantes (Montero - Rosas, 2021).

Filtros verdes: también conocidos como zanjas de infiltración o biofiltros, estos sistemas utilizan vegetación y materiales filtrantes (como arena y grava) para purificar las aguas residuales a medida que pasan a través de ellos. Estos sistemas, fomentan la depuración del agua en un alto porcentaje, además de contar con bajos costos de mantenimiento y facilidad de implementación (Torres - Forero, 2018).

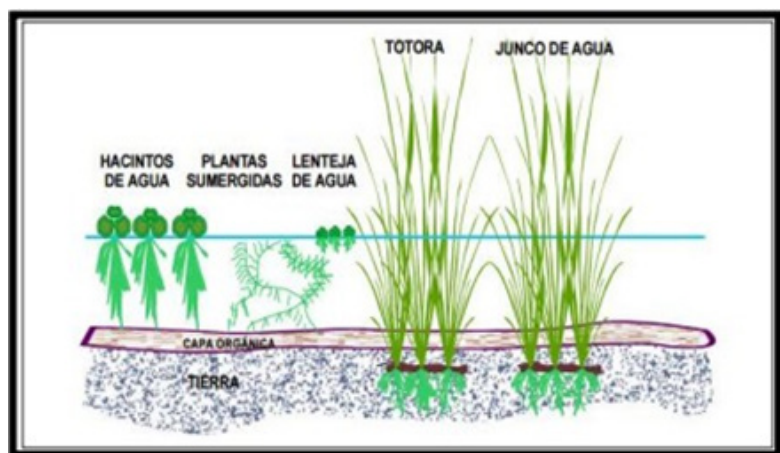
Sistemas de lodos activados: aunque más avanzados que las opciones anteriores, estos sistemas también se pueden implementar en zonas rurales. Implica la mezcla de aguas residuales con microorganismos en un tanque aeróbico para descomponer los contaminantes. Luego, el agua tratada se separa de los lodos y se libera o reutiliza (Vargas & Castro, 2021).

Biofiltro y Sus Partes

Un biofiltro, o filtro biológico, emplea materiales orgánicos húmedos para capturar y descomponer compuestos que generan malos olores. Este material actúa como un biotopo para las bacterias que, bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, purifican el aire. El proceso se lleva a cabo mediante la inyección del aire a través de una red de tubos perforados, que lo distribuyen en un lecho de filtración (Weidner Iberica, 2020).

Es un sistema que simula un humedal natural que purifica el agua como se muestra en la figura 1. Por esta razón, naturalmente se le llama humedal artificial. Esto se debe a que la profundidad es baja y el lecho filtrante está lleno de material poroso en el cual las partículas y microorganismos van quedando atrapados. Funciona como soporte para plantas y puede ser fijo o flotante (Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo, 2015).

Ilustración 27. Clasificación de Biofiltros



Fuente: Vizamal, 1998.

Lecho Filtrante: tiene la función básica de reducir y eliminar sólidos. El lecho filtrante proporciona un área para que las biopelículas bacterianas se acumulen y actúen dentro del filtro. Cabe mencionar su importante papel como soporte de la vegetación. Generalmente se utilizan antracita, arena y grava como lechos filtrantes y deben garantizar una filtración adecuada. Para garantizar la funcionalidad del biofiltro se debe tener en cuenta la correcta elección del material y aspectos importantes como la granulometría y la resistencia del material a la abrasión por parte del agua residual a tratar (Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo, 2015).

La *antracita* siendo el carbón mineral de mayor rango, se caracteriza por su elevado contenido de carbono, que puede alcanzar hasta un 95%.

Su densidad varía entre 1,2 y 1,8 g/cm³. Este material se destaca como un medio de filtración altamente efectivo para la clarificación del agua, tanto en aplicaciones potables como industriales, especialmente cuando se emplea en conjunto con arenas filtrantes (Antracita, 2018)

La *arena* es un conjunto de partículas de roca en descomposición, es un material formado por partículas que varían en tamaño desde 0,063 hasta 2 mm. En general, la composición más común de la arena es la sílice (SiO₂), aunque su composición puede variar dependiendo de las condiciones de la roca (Espinoza, 2000).

La *grava*, al igual que la arena, tiene un origen geológico, a través de una serie de procesos climáticos, la roca se desintegra o descompone en la naturaleza, su origen también es provocado por el hombre cuando rocas como la caliza, el granito, el basalto, la dolomita y el cuarzo sufren corte. Se encuentran en los lechos de los ríos y se caracterizan por tener tamaños que oscilan entre 3 y 70 mm (Flores, 2014).

Plantas Acuáticas: actúan como soporte de microorganismos que tienen el propósito de construir ambientes amenos para el crecimiento de estos. Son conocidas por recibir los nutrientes minerales desde el agua y beneficiar la transferencia de oxígeno desde las hojas hacia las raíces. Asimismo, absorben el carbono y nutrientes a través de sus tejidos. Las plantas sumergidas en agua absorben oxígeno, dióxido de carbono y minerales del agua. Sin embargo, cuando sus partes fotosintéticas están bajo el agua, su desarrollo no es óptimo, sobre todo cuando el agua está muy turbia. Además, las raíces de la planta albergan gran parte de la población microbiana (Delgadillo, 2010).

Microorganismos: presentes en los sistemas de tratamiento biológico, destacan por su notable capacidad metabólica, lo que les permite llevar a cabo la degradación de contaminantes en aguas residuales. En la parte superior del biofiltro, donde hay presencia de oxígeno, se realiza la degradación aerobia de los contaminantes, mientras que en el medio filtrante o granular se desarrollan microorganismos anaerobios (Sarango, 2016). La película biológica que se forma en estos sistemas alberga principalmente bacterias, hongos, levaduras y protozoarios.

Descripción de la Zona de Estudio

La Vereda de Teguanegue pertenece al municipio de Turmequé en la provincia de Márquez en Boyacá, es conocida por ser la más grande dentro del municipio, limita con el municipio de Ventaquemada y las veredas de Turmequé tales como Volcán Blanco, Pascata y Chiquira. Este sector comprende principalmente fincas productoras ganaderas, y familias campesinas que en sus predios se dedican al cultivo en su mayoría de papa, zanahoria, maíz y haba. Esta vereda cuenta con un buen servicio de agua potable, pero cabe recalcar que tiene un servicio deficiente de tratamiento de aguas residuales; algunas viviendas cuentan con pozos sépticos básicos los cuales permiten darles un manejo más adecuado a las aguas residuales, mientras otras solo vierten las aguas al suelo.

La vereda suele estar poblada por sectores, en este caso se divide en tres: Teguanegue 1 (Canelazo y La Pala), Teguanegue 2 y Teguanegue pequeño, en la cual cada sector lo componen viviendas contiguas como viviendas independientes o alejadas de las demás.

La vivienda de estudio se encuentra cerca de 10 casas a una distancia considerada, por lo cual según la normativa se considera como vivienda rural dispersa y para el tratamiento de agua residual se implementa un tratamiento descentralizado mediante el diseño de un biofiltro, la distribución de la zona se evidencia en la figura 2.

Ilustración 28. Distribución de las viviendas



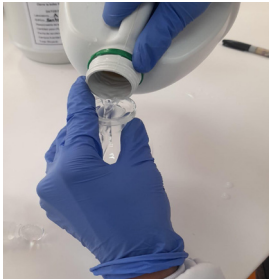
Fuente: Google Earth.

Caracterización de la Muestra de Agua

Tabla 10. Método de trabajo planteado para determinación de DQO, DBO5 SST

Nombre	Descripción	Evidencia
Muestra de agua	Se tomó una muestra de agua estancada en una vivienda rural de Turmequé, Boyacá con el fin de actuar como alícuota en el desarrollo del laboratorio.	
DQO	Se agregó 2,5 ml de la muestra de agua en un tubo de ensayo con tapa que ya contenía una solución la cual generó una reacción produciendo calor. Se dejó por 3 horas en el fotómetro de Hanna para luego obtener resultados.	

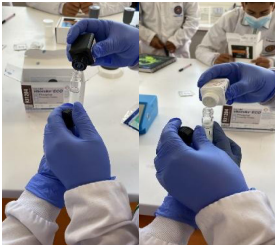
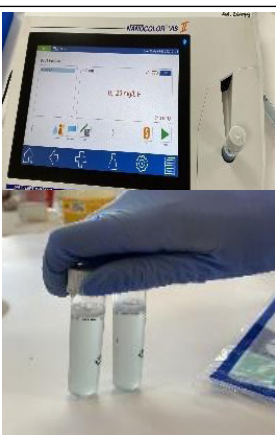
E. María Avellaneda D^o, C. Andrés Atara M^o, D. Gisell Cañón A^o, Samuel A. Duarte M^o,
L. Gustavo Gaona G^o, Karen Osorio N^o, Michael J. Rodríguez C^o,
Valentina Vargas A^o, D. Alejandra Vargas A^o.

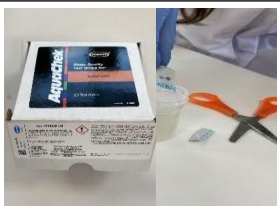
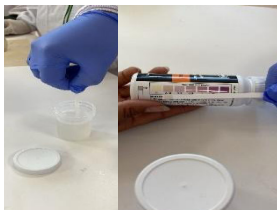
Preparación del agua de dilución	Para la determinación de la DBO en un litro de agua se debe disponer de 1 ml de solución de sulfato, cloruro férrico, fosfato y cloruro de calcio respectivamente.	
Botellas Winkler	Se utilizaron botellas de Winkler, las cuales se nombraron por blanco, inóculo, estándar, y tres más para muestra; no se llenaron por completo puesto que se les agregó más solución	
Inóculo y Estándar	Se agregó 2 ml de inóculo a cada botella sin incluir la de blanco y en solo estándar se agregó 6 ml.	
pH	Se tomó el valor de pH para la muestra de agua con equipo Multiparámetro de Hanna. En caso de no estar dentro de 6,5 y 7,5 se ajustó con hidróxido de sodio agregando 6 gotas a 1 N.	
Alícuota de muestra	Para las muestras 1, 2 y 3 con dilución se le agregó 10 ml, 15 ml y 20 ml respectivamente del agua contaminada que se recolectó por parte del grupo.	

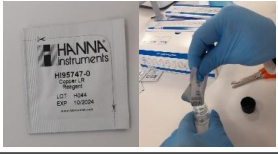
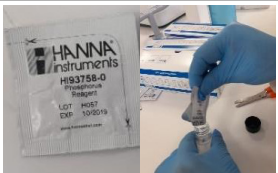
Oxígeno disuelto	A cada botella de <i>Winkler</i> con su debido proceso, se le tomó el oxígeno disuelto con el equipo de marca <i>Harsh</i> , obteniendo la concentración, el porcentaje de saturación y la temperatura.	
Aforar	Listo el proceso anterior, se agregó más dilución a las botellas hasta quedar completamente llenas, de tal forma que al tapar no quedará ninguna burbuja de aire.	
Sellado hermético	Antes de incubar fue necesario sellar herméticamente con las tapas y papel aluminio para garantizar que no ingresara aire y se generaran burbujas.	
Incubación	Por último, se llevó las muestras a la incubadora donde evitaron contacto con la luz; estas se sacaron luego de cinco días para tomar el <i>DBO</i> final.	
Sólidos sedimentables	En un cono de <i>imhoff</i> de 1000 ml se agregó agua dejando sedimentar por una hora para tener como resultado el volumen de sólidos sedimentables.	

Fuente: Propia.

Tabla 11. Método de trabajo planteado para determinación de Fosfatos, Cu, Fe, Cl, P y Cr6

Nombre	Descripción	Evidencia
Muestra de agua	Se tomó una muestra de agua estancada en una vivienda rural de Turmequé, Boyacá con el fin de determinar si existe la presencia de algunos metales	
Fosfatos	Se dispuso en dos tubos de ensayo la muestra de agua residual	
	A cada tubo de ensayo se le agregó 6 gotas de PO_4 -1 y 6 gotas de PO_4 -2, agitando cada uno por 10 segundos, para luego dejar actuar por 10 minutos	
	Pasado los 10 minutos se dispuso el tubo de ensayo en el espectrofotómetro donde arroja el valor de fosfatos en mg/l para al final promediar las dos muestras.	

Hierro	Se realizó un primer análisis a partir de una muestra rápida de <i>AquaCheck</i> . En este se agregó un sobre en la muestra de agua, agitando por 10 segundos, dejando actuar por 5 minutos.	
	Al tener contacto con el agua por medio de una cinta, arrojó un tono de color que permitió conocer el rango en que se encontraba el valor de hierro.	
	En segundo lugar, se utilizó el método <i>Hanna</i> donde se agregó un sobre de reactivo hierro rango bajo HI 93746-0 al tubo con la muestra de agua agitando por 10 segundos, dejando actuar por 5 minutos.	
	Posteriormente se introdujo el tubo con la muestra en el instrumento, se cerró la tapa se esperó 30 segundos y el fotómetro multiparámetro compacto arrojó el valor en mg/l para al final promediar las dos muestras.	
Cloro Total	Se utilizó el método <i>Hanna</i> donde se agregó un sobre de reactivo cloro HI 93701-0 al tubo con la muestra de agua agitando por 10 segundos, y se evidenció un cambio de color a tonalidad rosa.	
	Posteriormente se introdujo el tubo con la muestra en el instrumento, se cerró la tapa y se esperó durante 30 segundos. El fotómetro multiparámetro compacto arrojó el valor en mg/l y se promedió el valor de las dos muestras.	

Cromo 6	Se utilizó el método <i>Hanna</i> donde se agregó un sobre de reactivo cromo 6 HI 93723-0 al tubo con la muestra de agua agitando por 10 segundos	
	Posteriormente, se introduce el tubo con la muestra en el instrumento, se cierra la tapa se espera 30 segundos y el fotómetro multiparámetro compacto arroja el valor en $\mu\text{m/l}$ para luego hacer la respectiva conversión de unidades.	
Cobre	Se utiliza el método <i>Hanna</i> donde se agrega un sobre de reactivo cobre HI 9547-0 al tubo con la muestra de agua agitando por 10 segundos	
	Posteriormente, se introduce el tubo con la muestra en el instrumento, se cierra la tapa se espera 30 segundos y el fotómetro multiparámetro compacto arroja el valor en mg/l para al final promediar las dos muestras.	
Fosforo	Se utiliza el método <i>Hanna</i> donde se agrega un sobre de reactivo cobre HI 93758-0 al tubo con la muestra de agua agitando por 10 segundos	
	Posteriormente se introduce el tubo con la muestra en el instrumento, se cierra la tapa se espera 30 segundos y el fotómetro multiparámetro compacto arroja el valor en mg/l para al final promediar las dos muestras.	

Fuente: Propia.

Diseño del Biofiltro

- Cálculo de dotación Neta

Se tiene en cuenta que para el cálculo de la dotación neta total hay 5 personas habitando la vivienda, teniendo como base que cada persona presenta una dotación neta de 160 l/s.

- Datos

Dotación neta: 160 l/d.

Habitantes: 5 personas.

$$\text{Dotación neta total} = \text{Dotación neta} * \text{Habitantes}$$

$$\text{Dotación neta total} = 160 \text{ l/d} * 5 \text{ habitantes}$$

$$\text{Dotación neta total} = 800 \text{ l/d} - \text{hab}$$

- Aparatos hidrosanitarios

Los aparatos hidrosanitarios son la base fundamental para el diseño de un sistema de tratamiento de agua residual, debido a que se debe tener en cuenta las unidades de gasto de cada aparato para así obtener la asignación de caudales de cada uno de estos.

Tabla 12. Aparatos hidrosanitarios

Aparato	Unidades	Salida
Lavamanos	2	4
Lavadora	1	2
Lavaplatos	1	2
Lavadero		

Fuente: Propia.

- Medidas

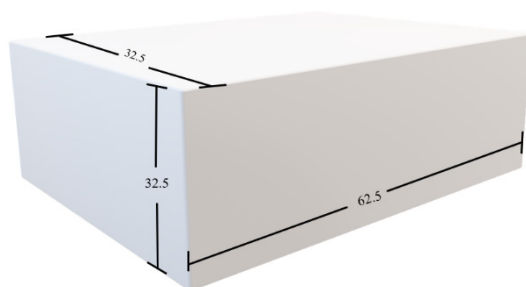
Escala 1:4

Largo: 62,5 cm

Ancho: 32,5 cm

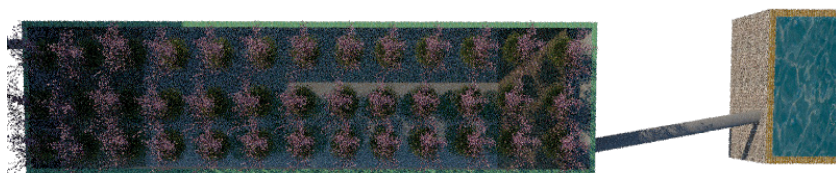
Alto: 32,5 cm

Ilustración 29. Tanque con medidas a escala



Fuente: Propia.

Ilustración 30. Vista en planta



Fuente: Propia.

Construcción del Biofiltro

Para la construcción del tanque se usó una silicona líquida para vidrio la cual se aplicó y se dejó secar por 24 horas como se muestra en la *figura 5*

Ilustración 31. Construcción del tanque



Fuente: Propia.

Ilustración 32. Pruebas de Fugas



Fuente: Propia.

Después de realizar la construcción del tanque se corroboró si el ensamble de los vidrios era el adecuado por medio de una prueba de fugas, agregando agua al tanque y determinando cuáles eran los puntos que no se encontraban correctamente unidos como se observa en la figura 6.

Se procedió a realizar la instalación de tubería y accesorios *PVC* (cf. figura 7), lo cual permitió el ingreso en el afluente y la salida del efluente.

Ilustración 33. Unión de accesorios PVC



Fuente: Propia.

Por último, se agregó el lecho filtrante, el agua base de estudio y las plantas fitorremediadoras como son las Lechuguín (*Eichhornia Crassipes*) como se muestra en la figura 8.

Ilustración 34. Biofiltro en etapa de pruebas

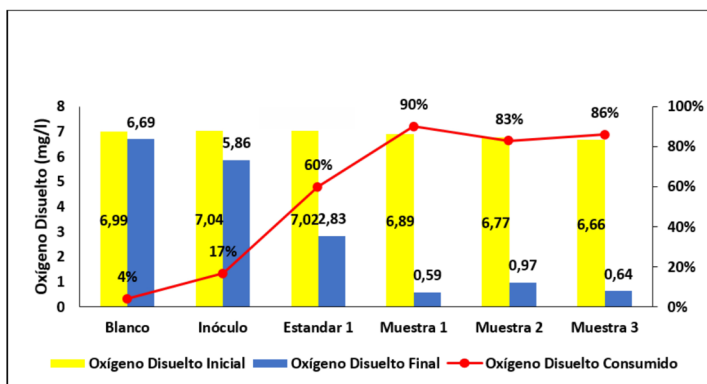


Fuente: Propia.

Evaluación de Rendimiento

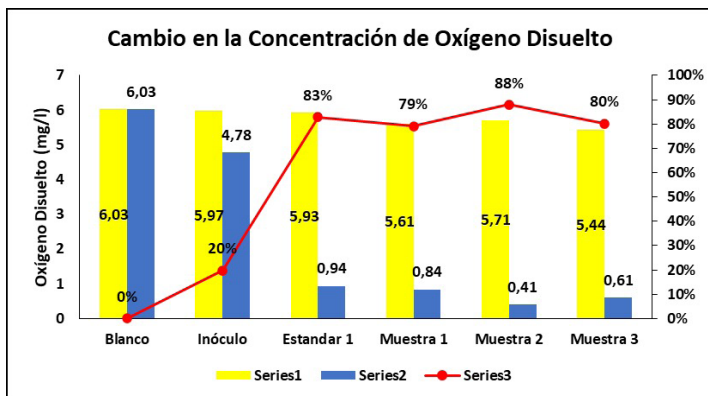
Teniendo la construcción del biofiltro, se tomó un tiempo de retención de ocho días antes de evaluar la salida del agua en contacto con las plantas fitorremediadoras, obteniendo así los resultados que se evidencian en las gráficas 1, 2 y 3.

Gráfico 13. Resultados iniciales OD



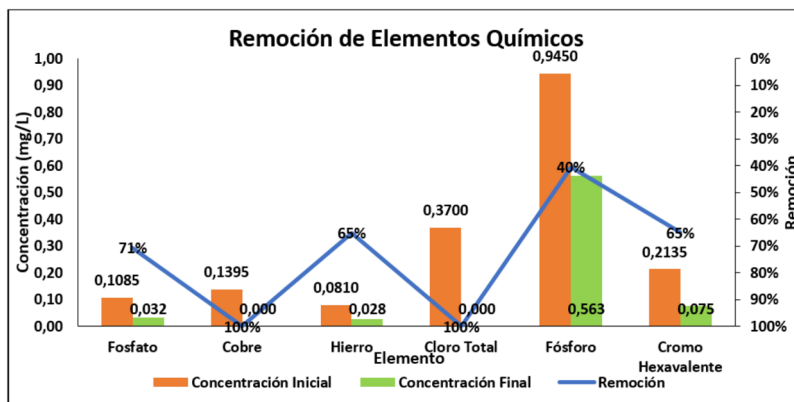
Fuente: Propia.

Figura 10. Resultados finales OD. Fuente: elaboración propia.



Teniendo en cuenta las gráficas anteriores se obtiene que la disminución en la concentración de oxígeno disuelto en un tiempo de retención de cinco días fue del 1%.

gráfico 13. Remoción de elementos químicos



Fuente: Propia.

En cuanto a la remoción de elementos químicos, se puede inferir que el porcentaje de remoción fue significativo, puesto que las concentraciones finales disminuyeron considerablemente en especial el cloro total con un 100%.

Conclusiones

El biofiltro demostró una notable eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales. Los componentes presentes en el lecho filtrante han desempeñado un papel crucial en la degradación de fosfato, cobre, hierro, cloro total, fósforo y cromo hexavalente superando valores de remoción del 73%.

La disminución en la concentración de oxígeno disuelto en un tiempo de retención de cinco días fue del 1% esto se debe a que no hay una recirculación del agua a escala de laboratorio. Sin embargo, al implementar el prototipo a la escala real los cambios del DBO podrían variar debido a que habría una circulación en el prototipo.

El enfoque biológico del biofiltro resalta su sostenibilidad ambiental. Al depender de procesos naturales de degradación biológica, se reduce la necesidad de productos químicos y energía, contribuyendo así a la reducción de la huella ambiental.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

157

- Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo. (2015). El biofiltro como alternativa tecnológica para el tratamiento de las aguas residuales domésticas. Banco Mundial. <https://www.worldbank.org/en/programs/global-water-security-sanitation-partnership>
- BCN. (2018). Técnicas y tratamientos para diferentes tipos de aguas residuales. https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/25552/2/Informe_Tratamiento_Aguas_Residuales.pdf
- Boyacá, Gobernación de. (2019). Agua, medio ambiente y gestión de riesgo. <https://www.boyaca.gov.co/images/planes/plan-de-desarrollo/pdd2016-09-T-Medio-Ambiente.pdf>
- Campo Usuga, J. F. (2022). Estado del arte de los sistemas sépticos para el tratamiento del agua residual en zonas rurales [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional UdeA. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/31573>
- Delgadillo. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf
- Díaz Cuenca, E., & Rodríguez, A. R. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: El caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (Sutrane) en San Miguel Almaya, México. Quivera, 5(1), 55–70.
- Espinoza, M. (2000). Libro de edafología. Bioamba.
- Flores, F. R. (2014). Granulometría de los suelos. <http://es.slideshare.net/freddyramirofloresvega/granulometria-en-los-suelos>

Gobierno de México. (2018). Filtración de aguas residuales con contaminantes recalcitrantes para remoción de macronutrientes. <https://www.gob.mx/imta/articulos/filtracion-de-aguas-residuales-con-contaminantes-recalcitrantes-para-remocion-de-macronutrientes>

Lucho-Constantino, C. A., Medina-Moreno, S. A., Beltrán-Hernández, R. I., Juárez-Cruz, B., Vázquez-Rodríguez, G. A., & Lizárraga-Mendiola, L. (2015). Diseño de fosas sépticas rectangulares mediante el uso de la herramienta FOSEP. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14(3), 757–765.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2021). Resolución 1256 de 2021. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/12/Resolucion-1256-de-2021.pdf>

Montero-Rosas, R. A. (2021). Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales por lagunas de oxidación para la parroquia Posorja [Trabajo de grado, Universidad Agraria del Ecuador]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/montero%20rosas%20rogger%20amado.pdf>

Rojas, R. (2002). Sistemas de tratamiento de aguas residuales: Gestión integral de tratamiento de aguas residuales (pp. 1–19).

Salamanca, Universidad de. (2020). Características del agua potable. <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/Caracteristicas.pdf>

Sarango Ornela. (2016). Diseño y construcción de 2 biofiltros con *Eichhornia crassipes* y *Lemna minor* para la evaluación de la degradación de contaminantes en aguas residuales de la extractora Río Manso EXA S.A. [Trabajo de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4930/1/236T0194.pdf>

TELWASA. (2022). Aguas residuales. <https://telwesa.com/aguas-residuales/>

Torres. (2022). Tratamientos de aguas residuales. Belzona. https://www.belzona.com/es/solution_maps/wastewater/money_map.pdf

Weidner Ibérica. (2020). Biofiltros: Medio ambiente. <https://www.weidneriberica.com/medio-ambiente-biofiltro>

Zurita-Martínez, F., Castellanos-Hernández, O. A., & Rodríguez-Sahagún, A. (2011). El tratamiento de las aguas residuales municipales en las comunidades rurales de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2(SPE1), 139–150.