

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO A BASE
DE CÁSCARAS DE COCO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUA
RESIDUAL AGRÍCOLA DE UNA FINCA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR**



AUTORES:

MARÍA TERESA ALZATE ESCORCIA

DANIELA BARRAGAN RUAS

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERIAS Y TECNOLOGICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR – CESAR

2026-1

**EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE FILTROS DE CARBÓN ACTIVADO A BASE
DE CÁSCARAS DE COCO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE AGUA
RESIDUAL AGRÍCOLA DE UNA FINCA DEL DEPARTAMENTO DEL CESAR**

AUTORES

MARÍA TERESA ALZATE ESCORCIA

DANIELA BARRAGAN RUAS

DIRECTOR:

JOSE MAURICIO PEREZ ROYERO

CODIRECTOR:

MIGUEL CALDERÓN CÁRDENAS

UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR

FACULTAD DE INGENIERIAS Y TECNOLOGICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA

VALLEDUPAR – CESAR

2026-1

DEDICATORIA

Con cariño y gratitud, dedicamos este trabajo de grado, en primer lugar, a Dios por guiarnos y permitirnos culminar esta etapa de nuestras vidas. A nuestros padres, quienes nos acompañaron y apoyaron durante todo este proceso, ofreciéndonos su amor y confianza en los momentos más difíciles. Gracias por creer en nosotras, por sus sacrificios y por ser motivo de lucha para alcanzar esta meta.



AGRADECIMIENTOS

Agradecerle a Dios por darnos la sabiduría, fortaleza y perseverancia en cada etapa para culminar este trabajo de grado.

De manera sincera y especial agradecemos a nuestro director José Mauricio Pérez Royero por sus valiosos conocimientos, dedicación, paciencia y su apoyo incondicional, los cuales fueron fundamentales para el desarrollo y culminación exitosa de esta investigación.

Así mismo, agradecemos a todas las personas que, de una u otra manera contribuyeron y nos acompañaron en el logro de esta importante meta académica.



RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de sistemas de filtración elaborados con carbón activado de cáscara de coco para el tratamiento de agua residual agrícola en una finca del departamento del Cesar. Inicialmente, se realizó la caracterización fisicoquímica del agua residual durante temporada seca y temporada de lluvias, analizando parámetros físicos, químicos y microbiológicos como temperatura, DBO5, DQO, pH, conductividad, turbidez, alcalinidad y dureza. Posteriormente, se diseñaron y construyeron tres sistemas piloto de filtración de lecho fijo, empleando diferentes configuraciones filtrantes: T1 (grava, arena y carbón activado), T2 (grava y carbón activado) y T3 (carbón activado). Los resultados obtenidos evidenciaron una disminución significativa de los parámetros físicos y químicos analizados después del proceso de filtración, especialmente en turbidez. El tratamiento T1 presentó el mejor desempeño durante ambas temporadas evaluadas, alcanzando los mayores porcentajes de remoción gracias a la integración de procesos físicos de filtración y mecanismos de adsorción proporcionados por el carbón activado. Así mismo, se observó una reducción de la carga contaminante del agua tratada respecto al agua residual sin tratamiento. El análisis estadístico realizado mediante pruebas de normalidad (Shapiro-Wilk) y análisis de varianza (ANOVA) evidenció diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p < 0.05$), confirmando la influencia de la configuración de los sistemas filtrantes sobre la eficiencia del tratamiento.

Palabras clave: Carbón activado; agua residual agrícola; filtración; adsorción; tratamiento de agua; cáscara de coco.

ABSTRACT

This study aimed to evaluate the efficiency of filtration systems made with coconut shell activated carbon for the treatment of agricultural wastewater on a farm in the Cesar department. Initially, the physicochemical characterization of the wastewater was performed during the dry and rainy seasons, analyzing parameters physicochemical such as temperature, DBO5, DQO, pH, conductivity, turbidity, alkalinity, and hardness. Subsequently, three pilot fixed-bed filtration systems were designed and built, using different filter configurations: T1 (gravel, sand, and activated carbon), T2 (gravel and activated carbon), and T3 (activated carbon). The results obtained showed a significant decrease in the analyzed physicochemical parameters after the filtration process, especially in turbidity. Treatment T1 exhibited the best performance during both seasons evaluated, achieving the highest removal percentages thanks to the integration of physical filtration processes and adsorption mechanisms provided by the activated carbon. A reduction in the pollutant load of the treated water compared to the untreated wastewater was also observed. Statistical analysis using normality tests (Shapiro-Wilk) and analysis of variance (ANOVA) revealed statistically significant differences between the treatments evaluated ($p < 0.05$), confirming the influence of the filter system configuration on treatment efficiency.

Keywords: Activated carbon; agricultural wastewater; filtration; adsorption; water treatment; coconut shell.

Contenido

LISTA DE FIGURAS	9
INTRODUCCIÓN	12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	16
3. OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
4. MARCO REFERENCIAL	19
4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	19
4.2 MARCO TEÓRICO	21
4.4 MARCO CONTEXTUAL	26
4.5 MARCO LEGAL	30
5. MARCO METODOLOGICO	30
5.1 LINEA Y SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN	30
5.2 ENFOQUE DEL ESTUDIO	30
5.3 ALCANCE DEL ESTUDIO.....	30
5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO.....	31
5.5 MUESTRA POBLACIONAL.....	31

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	40
7. CONCLUSIONES	23
7. RECOMENDACIONES	74
10. BIBLIOGRAFIA	76



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de activación.....	22
Figura 2. Ubicación del departamento del Cesar.....	30
Figura 4. Toma de muestras de agua.....	30
Figura 5. Proceso de caracterización inicial	33
Figura 7. Resultado final del carbón activado de coco	10
Figura 8. Sistema de filtración con carbón activado en configuración experimental	12



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normatividad aplicable	20
Tabla 2. Propiedades físicas y químicas del carbón comprado	26
Tabla 3. Puntos de muestreo	30
Tabla 4. Condiciones de la toma de muestras de agua residual agrícola.....	31
Tabla 5. Caracterización inicial de las muestras de agua residual de la temporada seca	40
Tabla 6. Caracterización inicial de las muestras de agua residual de la temporada de lluvia.....	41
Tabla 7. Etapas del acondicionamiento del carbón activado de coco.....	49
Tabla 8. Componentes del sistema de filtración y características técnicas	13
Tabla 9. Condiciones operativas del proceso de filtración	17
Tabla 10. Cálculo de caudal para cada sistema filtrante.....	19
Tabla 11. Cálculo de carga hidráulica de cada sistema filtrante	20
Tabla 12. Cálculo del tiempo de retención hidráulico de cada sistema filtrante.....	21
Tabla 13. Espesor de los medios filtrantes empleados en cada tratamiento	21
Tabla 14. Parámetros hidráulicos y operativos del sistema filtrante	22
Tabla 15. Resultados físicos, químicos y microbiológicos del agua tratada por réplica y tratamiento en temporada seca	70
Tabla 16. Resultados fisicoquímicos del agua tratada por réplica y tratamiento para la temporada de lluvia	70

Tabla 17. Porcentajes de remoción obtenidos para cada tratamiento de la temporada seca	77
Tabla 18. Porcentajes de remoción obtenidos para cada tratamiento de la temporada lluviosa.....	10
Tabla 19. Resultados de la prueba de normalidad temporada seca.....	14
Tabla 20. Resultados de la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) – Temporada de lluvias	15
Tabla 21. Resultados de la prueba ANOVA temporada seca	18
Tabla 22. Resultados de la prueba ANOVA – Temporada de lluvias	19



INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital para el desarrollo de las actividades humanas, especialmente en el sector agrícola, donde se utiliza ampliamente para riego, limpieza de cultivos y otras labores conexas. Sin embargo, el uso intensivo del agua en estas actividades genera aguas residuales cargadas de contaminantes como sedimentos, nutrientes, residuos de fertilizantes y agroquímicos, que pueden afectar gravemente los ecosistemas acuáticos y la salud pública si no se tratan adecuadamente (FAO, 2017). En regiones rurales como el departamento del Cesar, en Colombia, es común que estas aguas sean vertidas directamente al ambiente sin ningún tipo de tratamiento, lo que contribuye a la contaminación de cuerpos de agua y fuentes hídricas utilizadas por las comunidades locales.

Ante esta problemática, surge la necesidad de implementar soluciones sostenibles, accesibles y eficientes para el tratamiento del agua en entornos rurales. Una alternativa viable es el uso de tecnologías basadas en recursos locales, como el carbón activado derivado de residuos agroindustriales, entre ellos la cáscara de coco. El carbón activado es un material ampliamente reconocido por su capacidad de adsorber contaminantes orgánicos e inorgánicos, gracias a su alta porosidad y superficie específica (Ahmad et al., 2020). Su elaboración a partir de desechos vegetales no solo permite el aprovechamiento de residuos, sino que también reduce los costos de producción y contribuye a una economía circular.

En este contexto, el presente proyecto tuvo como objetivo evaluar la efectividad de un sistema filtrante elaborado con carbón activado a partir de cáscaras de coco para el tratamiento de aguas residuales agrícolas en una finca del departamento del Cesar, como una solución ecoeficiente y adaptable a contextos rurales. Esta iniciativa buscó no solo ofrecer una alternativa tecnológica asequible, sino también aportar al cuidado del medio ambiente, promover la gestión sostenible del recurso hídrico y fortalecer la conciencia ambiental entre los agricultores. La investigación se desarrolló bajo un enfoque metodológico mixto, que permitió analizar tanto los aspectos técnicos del sistema filtrante como su aplicabilidad práctica en comunidades agrícolas.



1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El uso intensivo de agua en actividades agrícolas, especialmente en zonas rurales, ha conllevado a la generación constante de aguas residuales que contienen sedimentos, materia orgánica, residuos de fertilizantes y agroquímicos que, si no son tratados adecuadamente, pueden contaminar fuentes superficiales y subterráneas, afectando tanto los ecosistemas como la salud humana (FAO, 2017). A diferencia de las aguas residuales domésticas, las aguas agrícolas presentan una composición variable, pero tienden a contener altas concentraciones de nitratos, fosfatos y pesticidas, que representan una amenaza para la biodiversidad acuática y la calidad del recurso hídrico (Pérez, 2020).

En muchas regiones agrícolas del Caribe colombiano, como el departamento del Cesar, no existen sistemas adecuados para el tratamiento de estas aguas (agrícolas), las cuales son comúnmente vertidas sin ningún tipo de control, provocando procesos de eutrofización, y afectaciones a la calidad del agua utilizada por las comunidades aledañas (IDEAM, 2021), además, esta situación se agrava por la falta de infraestructura, recursos técnicos y económicos, así como la limitada conciencia ambiental por parte de pequeños productores.

A pesar de la existencia de tecnologías convencionales para el tratamiento de aguas contaminadas, estas suelen ser costosas, de difícil mantenimiento o inaccesibles

para zonas rurales (Pérez, 2020), por ello, se hace necesario el diseño de estrategias basadas en recursos locales, sostenibles y de bajo costo (Ríos et al., 2019; Ahmad et al., 2020).

Así mismo, el tamaño de partícula del carbón activado constituye un factor determinante en la eficiencia de los procesos de adsorción y filtración del agua residual. Las partículas de menor tamaño presentan una mayor superficie específica y un número superior de poros activos, lo que favorece la retención de contaminantes disueltos y suspendidos, incrementando la capacidad de remoción de materia orgánica, color y turbidez (Mohan & Pittman, 2018). Sin embargo, un tamaño de partícula excesivamente fino puede ocasionar pérdida de carga y disminución del caudal filtrado, afectando la operatividad del sistema (Bansal & Goyal, 2019). Por su parte, las partículas de mayor tamaño facilitan el flujo del agua, pero reducen el área de contacto y, por tanto, la eficiencia de adsorción (Gupta et al., 2021). En este sentido, diversos estudios han señalado que un rango de tamaño entre 0.5 y 2.0 mm representa un equilibrio adecuado entre capacidad adsorbente y rendimiento hidráulico en filtros de carbón activado de origen vegetal, como los obtenidos a partir de cáscaras de coco (Ahmad et al., 2020; Ríos et al., 2019). Por lo tanto, controlar y estandarizar el tamaño de partícula durante la preparación del carbón activado es esencial para optimizar la eficiencia del sistema filtrante y garantizar la estabilidad del proceso de tratamiento.

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

¿Cuál es la eficiencia de un sistema filtrante carbón activado de cáscaras de coco para el tratamiento de agua residual agrícola del departamento del Cesar?

2. JUSTIFICACIÓN

El acceso a agua limpia y segura sigue siendo una de las necesidades fundamentales en muchas comunidades rurales, especialmente en regiones donde no existen sistemas convencionales de tratamiento (Organización Mundial de la Salud, 2020). Frente a esta realidad, el desarrollo de soluciones sostenibles, económicas y de fácil implementación resulta esencial (Torres, 2024).

Por otro lado, el carbón activado es ampliamente reconocido por su alta porosidad, gran área superficial y capacidad de adsorción, lo que lo convierte en un material ideal para eliminar contaminantes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua. Su uso ha sido validado científicamente en la remoción de turbidez, color, compuestos orgánicos, metales pesados y microorganismos, entre otros (Universidad Nacional de Colombia, 2024).

En este contexto, el presente proyecto propuso evaluar la efectividad de un sistema filtrante elaborado a partir de carbón activado obtenido de cáscaras de coco, una alternativa innovadora y ambientalmente amigable que responde tanto a criterios técnicos como sociales. La ventaja de utilizar cáscaras de coco, un residuo agrícola abundante en zonas tropicales como el departamento del Cesar, radicó no solo en su bajo costo y disponibilidad, sino también en el aprovechamiento de un subproducto que

normalmente es desechado, promoviendo así principios de economía circular y producción más limpia (PML).

Adicionalmente, este proyecto se enmarcó en una propuesta de solución práctica, escalable, ya que, el desarrollo de un sistema filtrante artesanal tipo cartucho, fabricado a partir de carbón activado de cascaras de coco, representando una alternativa de bajo costo y alto impacto para mejorar la calidad del agua utilizada para actividades agrícolas en una finca del departamento del Cesar. Además, la estrategia promovió el uso eficiente de los recursos locales, reduce la dependencia de tecnologías costosas y fortalece las capacidades comunitarias en torno al cuidado ambiental.

Finalmente, la evaluación de la efectividad del filtro permitió establecer datos concretos sobre su desempeño en condiciones reales, contribuyendo al conocimiento técnico disponible sobre el uso de biomateriales en procesos de saneamiento. Así mismo, el proyecto pudo servir como base para futuras iniciativas de educación ambiental, emprendimientos sostenibles o implementación de tecnologías verdes en zonas rurales, generando así un impacto social, económico y ecológico significativo.



3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Evaluar la eficiencia de filtros de carbón activado a base de cáscaras de coco para la remoción de contaminantes de agua residual agrícola de una finca del departamento del Cesar

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el agua residual de uso agrícola desde sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas (T_c° , pH, conductividad, turbidez, alcalinidad, dureza, DBO₅, DQO) acorde a los requerimientos establecidos por la Resolución 0631 de 2015, sobre límites máximo permisibles de aguas residuales a fuentes hídricas
- Realizar un montaje piloto por medio de filtros de carbón activado a base de las cáscaras de coco como materia prima para el tratamiento de agua residual de uso agrícola
- Determinar el grado de remoción de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos obtenido del piloto a base de carbón activado de cascara de coco, con

base en la normatividad legal vigente sobre límites máximo permisible de vertimientos de aguas residuales (Res 0631/2015)

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En primer lugar, Torres (2024), realizó el estudio: elaboración de carbón activado a partir del endocarpio de coco. Su finalidad fue desarrollar un método para producir carbón activado a partir del endocarpio de coco y evaluar su capacidad de adsorción de contaminantes en agua. Se recolectaron endocarpios de coco y se sometieron a un proceso de carbonización y activación para producir carbón activado. Se evaluó la capacidad de adsorción del carbón activado mediante pruebas de laboratorio, utilizando contaminantes modelo como el azul de metileno y el fenol. Los resultados mostraron que el carbón activado producido a partir del endocarpio de coco tiene una alta capacidad de adsorción de contaminantes en agua. Se logró una eficiencia de remoción de hasta el 90% para el azul de metileno y el fenol. Los resultados sugieren que el carbón activado de endocarpio de coco puede ser un material prometedor para el tratamiento de agua contaminada.

Rondón et al., (2020), realizaron el estudio: Uso de cáscara de coco como medio filtrante para el tratamiento del agua. El objetivo fue evaluar la eficacia de la cáscara de coco como medio filtrante para eliminar contaminantes y mejorar la calidad del agua. Se

recolectaron cáscaras de coco y se procesaron para obtener un material poroso y adsorbente. Se diseñó un sistema de filtración que consistía en una columna de cáscara de coco y se evaluó su eficacia en la remoción de contaminantes como la turbidez, el color y los metales pesados. Se realizaron pruebas de laboratorio y se analizaron los resultados para determinar la eficiencia del sistema. Los resultados mostraron que la cáscara de coco es un medio filtrante eficaz para eliminar contaminantes del agua. Se logró una reducción significativa en la turbidez y el color del agua, y se eliminaron metales pesados como el plomo y el mercurio. Los resultados sugieren que la cáscara de coco puede ser un material prometedor para el tratamiento del agua en comunidades rurales o en situaciones de emergencia.

Por otro lado, Pérez (2020), realizó el análisis de la zeolita como medio filtrante en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de autos. El objetivo fue evaluar la eficacia de la zeolita como medio filtrante para eliminar contaminantes y mejorar la calidad de las aguas residuales provenientes del lavado de autos. Se recolectaron muestras de agua residual de un lavado de autos y se analizaron para determinar la concentración de contaminantes como aceites y grasas, sólidos suspendidos y metales pesados. Los resultados mostraron que la zeolita es un medio filtrante eficaz para eliminar contaminantes de las aguas residuales provenientes del lavado de autos. Se logró una reducción significativa en la concentración de aceites y grasas, sólidos suspendidos y metales pesados.

Reyes (2020). Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de

aguas residuales. El objetivo fue evaluar la eficiencia del aserrín y la fibra de coco como empaques en biofiltros para la remoción de contaminantes en agua residual y determinar cuál de los dos materiales es más efectivo. Se diseñaron y construyeron dos biofiltros, uno con aserrín y otro con fibra de coco, y se evaluó su eficiencia en la remoción de contaminantes como la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), los sólidos suspendidos totales (SST) y los nutrientes. Se realizaron pruebas de laboratorio y se analizaron los resultados para determinar la eficiencia de cada material. Los resultados mostraron que tanto el aserrín como la fibra de coco son materiales efectivos para la remoción de contaminantes en agua residual. Sin embargo, la fibra de coco mostró una mayor eficiencia en la remoción de DBO y SST, mientras que el aserrín fue más efectivo en la remoción de nutrientes. Los resultados sugieren que ambos materiales pueden ser utilizados como empaques en biofiltros para el tratamiento de agua residual.

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Carbón Activado

El carbón activado es un material altamente poroso con una gran capacidad de adsorción, utilizado ampliamente en procesos de purificación, tratamiento de aguas, y eliminación de compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en líquidos y gases. Su efectividad se debe a su elevada área superficial, la cual puede superar los 1000 m²/g (Bansal & Goyal, 2005).

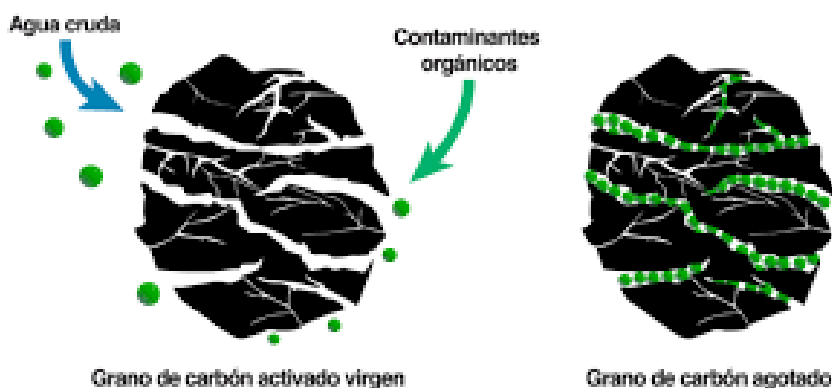
Este material se puede obtener a partir de diversas materias primas ricas en carbono, entre ellas residuos agrícolas como cáscaras de coco, cuescos de palma, cáscaras de nuez y otros residuos lignocelulósicos. La cáscara de coco es una de las

fuentes más comunes debido a su abundante disponibilidad, bajo costo y contenido elevado de lignina y celulosa, lo que proporciona estructuras carbonosas ideales para la activación (Ioannidou & Zabaniotou, 2007).

4.2.1.1. Proceso de activación

La producción de carbón activado implica dos fases: carbonización y activación. La carbonización consiste en la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de oxígeno, generando un material carbonoso. Posteriormente, en la fase de activación (física o química), se crean o amplían los poros que determinan la estructura microporosa del material (Reyes, 2020).

Figura 1. Proceso de activación



Nota: Tomado de Pérez (2020).

- **Activación física:** Se realiza con gases como CO₂ o vapor de agua a altas temperaturas (800–1000°C).

- **Activación química:** Utiliza agentes como ácido fosfórico (H_3PO_4), hidróxido de potasio (KOH), o cloruro de zinc (ZnCl_2) a temperaturas más bajas (400–600°C), permitiendo mayor control en el desarrollo de poros (Lua & Guo, 2001).

4.2.1.2. Mecanismo de adsorción

El carbón activado remueve contaminantes mediante adsorción, un proceso en el que moléculas de un contaminante se adhieren a la superficie del adsorbente. Los mecanismos implicados incluyen interacciones de Van der Waals, enlaces π - π , fuerzas electrostáticas y efectos hidrofóbicos. La capacidad de adsorción depende de (Torres, 2024):

- El tamaño de los poros (micro, meso y macro poros).
- La distribución de la superficie activa.
- La polaridad y carga del contaminante.

El carbón activado preparado a partir de cáscara de coco suele tener una mayor proporción de microporos, ideal para la adsorción de contaminantes orgánicos de bajo peso molecular (Reyes, 2020).

4.2.1.3. Aplicaciones en tratamiento de agua

Entre los contaminantes que pueden ser removidos por carbón activado se encuentran (Torres, 2024):

- Colorantes y sustancias fenólicas.
- Metales pesados (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+}).
- Materia orgánica disuelta.
- Compuestos orgánicos volátiles (COVs).

- Restos de fármacos o pesticidas.

4.2.2. Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas que han sido afectadas negativamente por el uso humano, incluyendo descargas domésticas, industriales y agrícolas. Estas aguas contienen una mezcla compleja de contaminantes físicos, químicos y biológicos, lo que representa un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente si no se tratan adecuadamente (Torres, 2024):

4.2.2.1. Clasificación

- **Aguas residuales domésticas:** Provenientes de actividades humanas (baños, cocinas, lavanderías).
- **Aguas industriales:** Contienen metales pesados, hidrocarburos, solventes y otros productos químicos.
- **Aguas agrícolas:** Ricas en nutrientes (nitratos, fosfatos) y pesticidas.

4.2.2.2. Parámetros de evaluación

Para el control y monitoreo de la calidad del agua residual, se evalúan indicadores clave como (Torres, 2024):

- **Turbidez:** Relacionada con la presencia de partículas suspendidas.
- **DQO y DBO:** Miden la cantidad de materia orgánica.
- **pH y conductividad eléctrica.**

4.3 MARCO CONCEPTUAL

Adsorción: Proceso por el cual un material, como el carbón activado, atrae y retiene moléculas de sustancias químicas en su superficie (Torres, 2024).

Aguas residuales: Aguas que han sido utilizadas en actividades humanas y que contienen contaminantes y sustancias químicas que deben ser tratadas antes de su descarga en el medio ambiente (Torres, 2024).

Análisis de resultados: Proceso que se utiliza para evaluar los resultados de un estudio o experimento y determinar las conclusiones y recomendaciones (Torres, 2024).

Calidad del agua: Conjunto de características físicas, químicas y biológicas del agua que determinan su aptitud para un uso determinado (Reyes, 2020).

Caracterización físico-química: Proceso que se utiliza para determinar las características físicas y químicas del agua, incluyendo parámetros como el pH, la turbidez y la alcalinidad (Pérez, 2020).

Carbón activado de cáscara de coco: Tipo de carbón activado que se produce a partir de la cáscara de coco y que se utiliza para adsorber sustancias químicas y contaminantes en el agua (Reyes, 2020).

Carbón activado: Un material poroso que se utiliza para adsorber sustancias químicas y contaminantes en el agua (Reyes, 2020).

Contaminantes: Sustancias químicas o biológicas que se encuentran en el agua y que pueden causar daños a la salud humana o al medio ambiente (Pérez, 2020).

Eficiencia: Capacidad de un sistema o proceso para lograr sus objetivos con el mínimo de recursos y energía (Torres, 2024).

Filtración: Proceso que se utiliza para eliminar partículas y contaminantes del agua mediante un medio poroso, como el carbón activado (Pérez, 2020).

Monitoreo: Proceso que se utiliza para seguir y evaluar la calidad del agua y el funcionamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales (Torres, 2024).

Normatividad: Conjunto de leyes y regulaciones que establecen los límites permisibles de contaminantes en el agua y que regulan el tratamiento y la descarga de aguas residuales (Torres, 2024).

Sistema de filtración: Conjunto de componentes que se utilizan para eliminar partículas y contaminantes del agua mediante un medio poroso, como el carbón activado (Pérez, 2020).

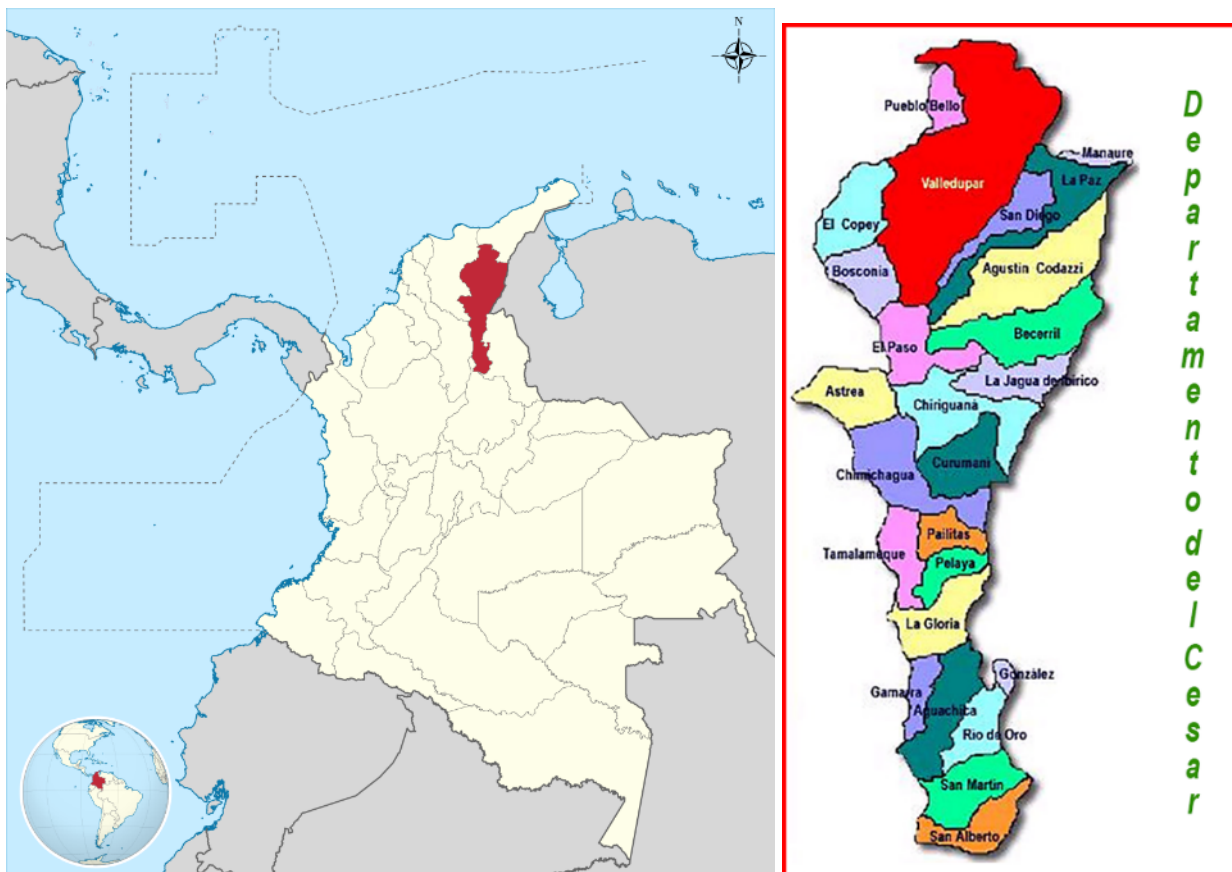
Sostenibilidad: Enfoque que busca minimizar el impacto ambiental y social de las actividades humanas, incluyendo el tratamiento de aguas residuales (Reyes, 2020).

Tratamiento de aguas residuales: Proceso que se utiliza para eliminar contaminantes y sustancias químicas de las aguas residuales antes de su descarga en el medio ambiente (Reyes, 2020).

4.4 MARCO CONTEXTUAL

El Cesar es uno de los treinta y dos departamentos que forman la República de Colombia. Su capital es Valledupar. Está ubicado al noreste del país, en las regiones Andina y Caribe. El 21 de junio de 1967 el presidente Carlos Lleras Restrepo sancionó la ley por medio de la cual se creó el departamento del Cesar (Gobernación del Cesar, 2020).

Figura 2. Ubicación del departamento del Cesar



Nota: Fotografía adaptada de Google, 2024

www.unicesar.edu.co

Teléfono conmutador PBX: (+57 605 588 5592)

Balneario Hurtado, Vía a Patillal

Valledupar – Cesar, Colombia

4.5 MARCO LEGAL

Las siguientes normas rigen la investigación:

Tabla 1. *Normatividad aplicable*

Normativa	Descripción	Aplicabilidad de la norma
CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE COLOMBIA	El artículo 79 de la Constitución Política de Colombia establece que "todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano". El artículo 80 establece que "el Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución". Estos artículos son fundamentales para el proyecto de diseño del filtro de carbón activado, ya que buscan proteger el medio ambiente y garantizar la sostenibilidad de los recursos naturales.	El proyecto se enfoca en el tratamiento de aguas residuales, lo que contribuye a proteger el medio ambiente y garantizar la sostenibilidad de los recursos hídricos.

Ley 99 De 1993	La Ley 99 de 1993 es una norma que establece los principios y criterios para la gestión ambiental en Colombia. Esta ley busca promover la conservación y protección del medio ambiente, y establece las bases para la planificación y gestión de los recursos naturales. La ley también crea el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que es el encargado de formular y implementar políticas ambientales en el país.	El proyecto se enmarca en los principios de la Ley 99 de 1993, ya que busca promover la conservación y protección del medio ambiente a través del tratamiento de aguas residuales, además, se contribuye a la gestión ambiental sostenible y se apoya la política ambiental del país.
Ley 142 de 1994:	La Ley 142 de 1994 es una norma que regula los servicios públicos domiciliarios, incluyendo el servicio de acueducto y alcantarillado. Esta ley establece las obligaciones y responsabilidades de los prestadores de servicios públicos y busca garantizar la calidad y eficiencia de los servicios.	El proyecto se relaciona con la Ley 142 de 1994, ya que el tratamiento de aguas residuales es un componente importante del servicio de alcantarillado.
Decreto 1594 de 1984:	El Decreto 1594 de 1984 es una norma que regula el uso del agua y el manejo de residuos líquidos en Colombia.	El proyecto se enmarca en los criterios y estándares establecidos en

	Esta norma establece los criterios y estándares para la calidad del agua y el manejo de residuos líquidos, y busca proteger la salud humana y el medio ambiente	el Decreto 1594 de 1984, ya que busca tratar las aguas residuales y reducir su impacto ambiental.
Decreto 3930 de 2010:	El Decreto 3930 de 2010 es una norma que regula la gestión integral de los residuos líquidos en Colombia. Esta norma establece los criterios y estándares para la gestión de residuos líquidos, y busca proteger la salud humana y el medio ambiente.	El proyecto se relaciona con el Decreto 3930 de 2010, ya que busca tratar las aguas residuales y reducir su impacto ambiental
Resolución 1256 de 2021:	La Resolución 1256 de 2021 es una norma que establece los parámetros y límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales tratadas en Colombia. Esta norma busca proteger la salud humana y el medio ambiente, y establece los criterios para la evaluación de la calidad del agua residual tratada.	El proyecto se enmarca en los parámetros y límites establecidos en la Resolución 1256 de 2021, ya que busca tratar las aguas residuales y reducir su impacto ambiental.

Resolución 0631 de 2015:	La Resolución 0631 de 2015 es una norma que establece los parámetros y límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales tratadas en Colombia. Esta norma busca proteger la salud humana y el medio ambiente, y establece los criterios para la evaluación de la calidad del agua residual tratada.	El proyecto se enmarca en los parámetros y límites establecidos en la Resolución 0631 de 2015, ya que busca tratar las aguas residuales y reducir su impacto ambiental.
Resolución 1541 de 2013:	La Resolución 1541 de 2013 es una norma que establece los requisitos y procedimientos para la obtención de permisos de vertimiento de aguas residuales en Colombia. Esta norma busca proteger la salud humana y el medio ambiente, y establece los criterios para la evaluación de los permisos de vertimiento.	El proyecto se relaciona con la Resolución 1541 de 2013, ya que busca tratar las aguas residuales y reducir su impacto ambiental.

Nota: Tabla elaborada por los autores, 2025

5. MARCO METODOLOGICO

5.1 LINEA Y SUBLINEA DE INVESTIGACIÓN

Conforme al Acuerdo N°003 del 08 de julio de 2021 establecido por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y Tecnológicas, la línea, sublínea y área temática a la cual se adscribe esta práctica académica:

La línea de investigación perteneciente al programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria es Sostenibilidad Y Gestión Ambiental

Sublínea del programa corresponde a Gestión Integral del recurso hídrico.

Área temática: Procesos de tratamiento de agua potable y tratamiento de aguas residuales.

5.2 ENFOQUE DEL ESTUDIO

El presente proyecto adoptó un enfoque cuantitativo, dado que se buscó comprobar la eficacia de un material filtrante elaborado a partir de carbón activado de cáscaras de coco para el tratamiento de aguas residuales agrícolas en una finca del departamento del Cesar. De acuerdo con Hernández et al., (2014), el enfoque cuantitativo permitió recolectar datos medibles que se analizaron estadísticamente con el fin de establecer patrones y comprobar hipótesis.

5.3 ALCANCE DEL ESTUDIO

El presente estudio tuvo un alcance aplicado y experimental, dado que busca evaluar en condiciones controladas la eficiencia de filtros de carbón activado elaborados

a partir de cáscaras de coco para la remoción de contaminantes presentes en agua residual agrícola.

El estudio se desarrolló a escala piloto, mediante el montaje y ensayo de filtros en laboratorio, con el propósito de analizar su desempeño técnico y establecer su potencial de aplicación a mayor escala en sistemas rurales de tratamiento de aguas residuales. Los resultados permitieron validar la viabilidad ambiental y funcional del uso de materiales naturales como el carbón activado de cáscara de coco en procesos de depuración sostenible.

5.4 POBLACIÓN DE ESTUDIO

La población de estudio estuvo compuesta por muestras de agua residual agrícola de una finca del departamento del Cesar, provenientes de fuentes no tratadas que presentan altos niveles de turbidez y contaminación orgánica.

5.5 MUESTRA POBLACIONAL

La muestra fue no probabilística de tipo intencional, seleccionada con base en criterios técnicos. Se tomó 1 muestra representativa de agua residual agrícola de una finca del departamento del Cesar con un total de 30 litros, dividiendo 24 litros para los filtros y el restante para enviar al laboratorio. Este tipo de muestreo fue adecuado en investigaciones exploratorias o de prueba de concepto, cuando no se busca generalizar a toda una población, sino evaluar el funcionamiento de un prototipo en condiciones reales controladas (Sampieri et al., 2014).

5.6 DESARROLLO METODOLÓGICO

Fase 1. Caracterizar físico, químico y microbiológicamente (temperatura, DBO5, DQO, pH, conductividad, turbidez, alcalinidad, dureza) muestras de agua residual agrícola en una finca del departamento del Cesar según los lineamientos de la Resolución 0631 de 2015

Actividad 1.1 Toma de muestras agua residual agrícola en una finca del departamento del Cesar

El objetivo de esta actividad fue obtener muestras representativas de agua residual agrícola para evaluar su calidad y determinar la eficacia del filtro de carbón activado con cáscaras de coco en su tratamiento. La toma de muestras se realizó en una finca del departamento del Cesar, donde se colectarán muestras de agua residual agrícola.

La toma de muestras se realizó siguiendo los protocolos establecidos para la colecta de muestras de agua residual del IDEAM (2018). Se utilizaron recipientes estériles y se siguieron las siguientes etapas:

1. Identificación del punto de muestreo: Se identificó el punto de descarga de agua residual agrícola en una finca del departamento del Cesar
2. Colecta de muestras: Se colectaron muestras de agua residual en recipientes estériles, siguiendo los protocolos de seguridad y manipulación adecuados.
3. Etiquetado y almacenamiento: Las muestras se etiquetaron y almacenaron en condiciones adecuadas para su transporte y análisis posterior.

Actividad 1.2 Caracterización física, química y microbiológica de la muestra de agua residual tomadas en una finca del departamento del Cesar

La caracterización física, química y microbiológica se realizó en el laboratorio de la Universidad Popular del Cesar, sede Valledupar, utilizando métodos estandarizados y validados. Se siguieron los protocolos de seguridad y manipulación adecuados para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados.

Se evaluaron los siguientes parámetros física, química y microbiológica del agua residual agrícola:

- Temperatura: Se determinó la temperatura del agua residual agrícola utilizando un termómetro calibrado.

- DBO5: Se determinó la materia orgánica del agua residual agrícola utilizando una incubadora calibrada y medición de oxígeno disuelto.

- DQO: Se determinó la cantidad de materia orgánica y compuestos oxidables del agua residual agrícola utilizando un digestor calibrado.

- pH: Se determinó el pH del agua residual agrícola utilizando un pHmetro calibrado.

- Turbidez: Se determinó la turbidez del agua residual agrícola utilizando un turbidímetro.

- Alcalinidad: Se determinó la alcalinidad del agua residual agrícola utilizando un método de titulación.

- Dureza: Se determinó la dureza del agua residual agrícola utilizando un método de titulación.

Se utilizaron los siguientes equipos y materiales:

- Termómetro: Un termómetro calibrado para determinar la temperatura del agua residual.

- Incubadora: Una incubadora para determinar la demanda química de oxígeno durante cinco días del agua residual agrícola

- Digestor: Un digestor para determinar la demanda química de oxígeno durante dos horas del agua residual agrícola

- pHmetro: Un pHmetro calibrado para determinar el pH del agua residual agrícola

- Turbidímetro: Un turbidímetro para determinar la turbidez del agua residual agrícola

- Materiales de titulación: Materiales de titulación para determinar la alcalinidad y dureza del agua residual agrícola

Actividad 1.3 Análisis de los resultados obtenidos con la Resolución 0631 de 2015

El objetivo de esta actividad fue comparar los resultados obtenidos en la caracterización física, química y microbiológica del agua residual agrícola con los criterios establecidos en la Resolución 0631 de 2015, para determinar si el agua residual cumplía con los estándares de calidad establecidos por la norma.

Para esto, se analizaron los resultados obtenidos en la caracterización física, química y microbiológica del agua residual agrícola y se compararon con los criterios establecidos en la Resolución 0631 de 2015. Se evaluarán los siguientes parámetros:

- pH: Se comparó el pH del agua residual con el rango establecido en la norma.
- Temperatura: Se comparó la temperatura del agua residual con el rango establecido en la norma.
- DBO5: Se comparó la demanda bioquímica de oxígeno del agua residual con el rango establecido por la norma.
- DQO: Se comparó la demanda química de oxígeno del agua residual con el rango establecido por la norma.
- Turbidez: Se comparó la turbidez del agua residual con el límite establecido en la norma.
- Alcalinidad: Se comparó la alcalinidad del agua residual con el límite establecido en la norma.
- Dureza: Se comparó la dureza del agua residual con el límite establecido en la norma.

Los resultados del análisis se presentaron en forma de tablas y gráficos, mostrando los valores obtenidos para cada parámetro y su comparación con los criterios

establecidos en la norma. Se determinó si el agua residual agrícola en una finca del departamento del Cesar, cumple con los estándares de calidad establecidos por la norma y se identificarán los parámetros que requieren atención especial.

Fase 2. Desarrollar el sistema filtrante de carbón activado utilizando cáscaras de coco como materia prima para el tratamiento de agua residual

Actividad 2.1 Realizar la compra del carbón activado de coco

El objetivo de esta actividad fue realizar la compra del carbón activado de coco para desarrollar el sistema filtrante de carbón activado, se indagó a nivel nacional opción de Carbon fresco y económico.

Tabla 2. *Propiedades físicas y químicas del carbón comprado*

PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS	
Color:	Negro
Tamaño medio:	2,5mm
Densidad aparente:	0,49 - 510 mg/cc
pH	9 - 11
Humedad:	5% (max)
CTC:	60% (min)

Fuente: Elaboración propia y tomada de las especificaciones del producto.

Se necesitó alrededor de 10 kilogramos de Carbon de cáscaras de coco para desarrollar el sistema filtrante de carbón activado. Finalmente, el Carbon de cáscaras de

coco se almacenó en un lugar seco y ventilado, protegido de la humedad y la contaminación. Se tomaron medidas para prevenir la proliferación de plagas y enfermedades.

Actividad 2.2 Construcción del sistema de filtración de carbón activado

La construcción del sistema de filtración se realizó tomando como base metodológica los lineamientos propuestos por la Universidad Nacional de Colombia (2024) y Torres (2024), adaptándolos a las condiciones experimentales del estudio y al uso de materiales de fácil acceso y bajo costo.

El sistema fue diseñado bajo el principio de filtración en flujo descendente, empleando recipientes cilíndricos plásticos con capacidad aproximada de 8 litros. Con el propósito de evaluar la eficiencia de diferentes configuraciones filtrantes en el tratamiento del agua residual agrícola, se construyeron tres filtros experimentales independientes, utilizando combinaciones de grava, arena y carbón activado de cáscara de coco como medio adsorbente principal.

El primer sistema filtrante (T1) estuvo conformado por una capa de grava gruesa en la parte inferior, seguida de una capa de arena y una capa superior de carbón activado, buscando integrar procesos de sedimentación, filtración física y adsorción química dentro de una misma unidad experimental.

El segundo sistema (T2) fue construido utilizando una capa de grava y una capa de carbón activado, con el fin de evaluar el comportamiento del material adsorbente bajo

una configuración simplificada, reduciendo el uso de medios filtrantes intermedios como la arena.

Por su parte, el tercer sistema (T3) estuvo compuesto únicamente por carbón activado de cáscara de coco, permitiendo analizar de manera directa la capacidad adsorbente del material frente a los contaminantes presentes en el agua residual agrícola.

Adicionalmente, en cada unidad filtrante se incorporó una malla de soporte entre las capas, cuya función fue evitar la migración del material filtrante y facilitar la estabilidad estructural del sistema durante el proceso experimental.

Fase 3. Determinar el grado de remoción de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos obtenido del piloto a base de carbón activado de cascara de coco, con base en la normatividad legal vigente sobre límites máximo permisible de vertimientos de aguas residuales (Res 0631/2015)

Actividad 3.1 Realizar el proceso de filtración

Preparación del sistema: Antes de iniciar el proceso de filtración, se verificó que el sistema estuviera correctamente construido y que todos los componentes estuvieran en buen estado. Se aseguró que el carbón activado esté adecuadamente colocado en el filtro.

- **Adición del agua residual**

Se añadió el agua residual agrícola al sistema de filtración, asegurándose de que el nivel de agua fuese adecuado para el funcionamiento del sistema.

- **Tiempo de contacto**

El agua residual se dejó en contacto con el carbón activado durante un período determinado, que puede variar dependiendo de los objetivos del tratamiento y las características del agua residual. Según Torres (2024), se usó entre 1-2 horas.

Actividad 3.2 Caracterización física, química y microbiológica final

El objetivo de esta actividad fue evaluar la efectividad del sistema de filtración de carbón activado en la remoción de contaminantes del agua residual agrícola.

Se evaluarán los siguientes parámetros en el agua residual tratada:

- Turbidez: Se determinó la turbidez del agua residual tratada para evaluar la efectividad del sistema en la remoción de partículas en suspensión.
- DBO5: Se determinó la demanda bioquímica de oxígeno del agua residual tratada para evaluar la efectividad del sistema en la remoción de materia orgánica.
- DQO: Se determinó la demanda química de oxígeno del agua residual tratada para evaluar la efectividad del sistema en la reducción de materia orgánica y compuestos oxidables.
- Alcalinidad: Se determinó la alcalinidad del agua residual tratada para evaluar la efectividad del sistema en la remoción de iones alcalinos.
- Dureza: Se determinó la dureza del agua residual tratada para evaluar la efectividad del sistema en la remoción de iones de calcio y magnesio.

La caracterización final se realizó utilizando los mismos métodos y equipos que se utilizaron en la caracterización inicial del agua residual. Se tomaron muestras del agua residual tratada y se analizaron en el laboratorio para determinar la efectividad del sistema.

Los resultados de la caracterización final se compararon con los resultados iniciales para evaluar la efectividad del sistema de filtración de carbón activado. Se determinó la reducción en la concentración de contaminantes y se evaluó si el agua residual tratada cumple con los estándares de calidad establecidos.

La efectividad del sistema de filtración de carbón activado se evaluó en función de la reducción en la concentración de contaminantes y la mejora en la calidad del agua residual tratada. Se determinó si el sistema es efectivo en la remoción de contaminantes y si es adecuado para su uso en el tratamiento de agua residual agrícola.

5.7 DISEÑO EXPERIMENTAL

El presente estudio se enmarcó en un diseño experimental de tipo cuasi experimental, porque busca resolver un problema práctico (tratamiento de aguas residuales agrícolas) mediante pruebas controladas, en el que se evaluó el comportamiento del tratamiento de agua residual agrícola mediante filtros de carbón activado fabricado a partir de cáscaras de coco.

Variables del estudio

- Variable independiente: Carbón activado

- Variables dependientes: Valores finales de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos ($T^{\circ}\text{C}$, pH, turbidez, conductividad, alcalinidad, dureza, DBO₅, DQO).
- Variables controladas: Tiempo de contacto, volumen de agua tratada, caudal de entrada, diseño del filtro, temperatura ambiental.

Análisis de datos

Los resultados se analizaron estadísticamente utilizando medidas de tendencia central (media, mediana), porcentajes de remoción y gráficos comparativos. Además, se aplicó ANOVA o prueba de Kruskal-Wallis (según normalidad de los datos) para determinar si existen diferencias significativas entre los sistemas de filtración con carbón activado.

Justificación del diseño

Este diseño experimental permitió evaluar de manera controlada que sistema de filtración ofrece mayor eficiencia de tratamiento, lo que es crucial para optimizar la implementación de esta tecnología en contextos rurales. Además, la comparación frente a los límites de vertimiento de la Resolución 0631 de 2015 garantizará la validez normativa del tratamiento propuesto.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.1 Caracterización física, química y microbiológica (temperatura, DBO5, DQO, pH, conductividad, turbidez, alcalinidad, dureza) de muestras de agua residual agrícola en una finca del departamento del Cesar según los lineamientos de la Resolución 0631 de 2015

6.1.1 Toma de muestras agua residual agrícola en una finca del departamento del Cesar

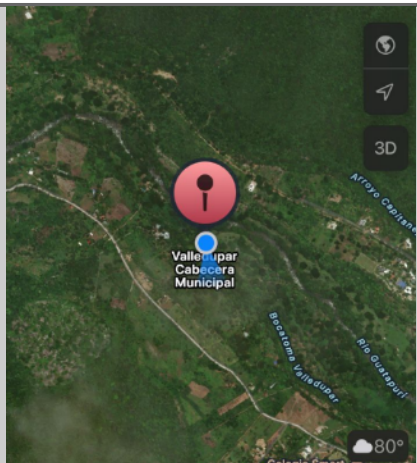
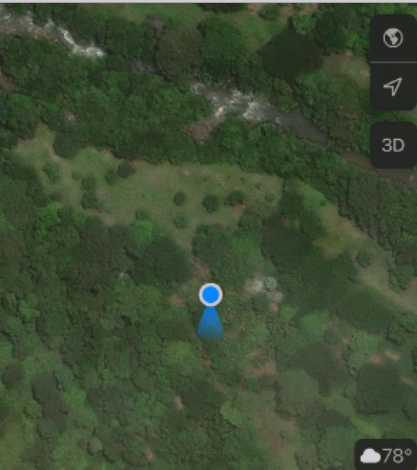
Para la caracterización física, química y microbiológica inicial se realizó la toma de muestras en una finca ubicada en el departamento del Cesar (la cual se mantiene anónima por acuerdos con el propietario), seleccionada bajo criterios técnicos relacionados con la presencia de descargas de agua residual provenientes de actividades agrícolas. El muestreo fue de tipo no probabilístico intencional, dado que se orientó a evaluar condiciones específicas del vertimiento y su interacción con el cuerpo hídrico receptor, sin pretender la generalización de los resultados, en concordancia con lo planteado por Sampieri et al. (2014) para estudios de carácter exploratorio.

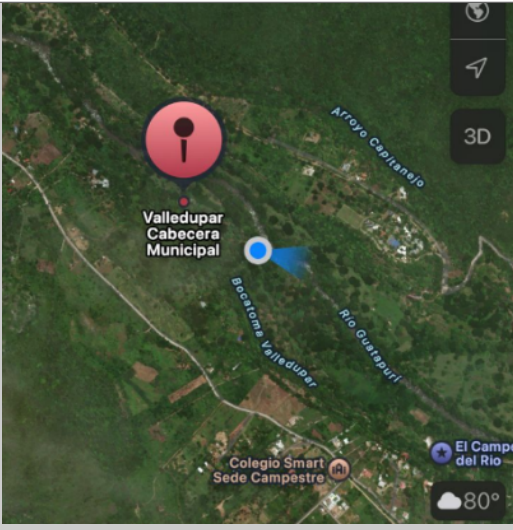
La recolección de muestras se llevó a cabo durante dos periodos climáticos representativos de la zona: temporada seca y temporada de lluvias, con el propósito de identificar posibles variaciones en las características físicas, químicas y microbiológicas del agua residual agrícola asociadas a los cambios en las condiciones hidrometeorológicas y al arrastre de materiales provenientes de las actividades agrícolas.

Se definieron tres puntos estratégicos de muestreo, con el propósito de analizar la variación espacial de la calidad del agua en relación con el vertimiento agrícola.



Tabla 3. *Puntos de muestreo*

Punto de muestreo	Descripción	Coordenadas	Fotografía
Punto 1 (antes del vertimiento)	Ubicado aguas arriba, sin influencia directa del efluente.	10.51423° N; 73.29833° O	
Punto 2 (vertimiento)	correspondiente a la descarga directa del agua residual agrícola.	10.51394°N; 73.29729°O	

Punto 3 (después del vertimiento):	Localizado aguas abajo, donde se evidencia la mezcla del efluente con el cuerpo hídrico receptor.	10.51394°N; 73.29729° O	
--	--	--------------------------------	---

Fuente: Elaboración propia



Figura 3. Toma de muestras de agua



Fuente: Fotografía tomada por las autoras, 2026

La recolección de las muestras se realizó siguiendo los lineamientos establecidos por el IDEAM (2018) para el muestreo de aguas, utilizando recipientes estériles previamente acondicionados, con el fin de garantizar la integridad de las muestras y evitar contaminaciones externas.

Se obtuvo un volumen total aproximado de 30 litros de agua residual en el punto de vertimiento, el cual fue empleado 6 litros para la caracterización física, química y microbiológica. Posteriormente, se utilizó el restante como afluente del sistema de filtración con carbón activado, al representar el efluente sin dilución generado por la actividad agrícola. En la Tabla 4 se presentan las condiciones generales del proceso de muestreo.

Tabla 4. *Condiciones de la toma de muestras de agua residual agrícola*

Parámetro	Descripción
Tipo de muestreo	No probabilístico intencional
Lugar de muestreo	Finca agrícola, departamento del Cesar
Puntos de muestreo	Antes, en y después del vertimiento
Punto de referencia	Descarga de agua residual agrícola
Volumen recolectado	30 litros (punto de vertimiento)
Tipo de recipiente	Recipientes estériles
Conservación	Almacenamiento en condiciones controladas de temperatura
Referente técnico	Protocolo IDEAM (2018)
Finalidad del muestreo	Caracterización física, química y microbiológica y análisis de la variación espacial del vertimiento

Fuente: Elaboración propia

Las muestras correspondientes a los tres puntos fueron debidamente etiquetadas y conservadas en condiciones controladas de temperatura, asegurando su estabilidad hasta el momento de su análisis en laboratorio.

6.1.2 Caracterización física, química y microbiológica de la muestra de agua residual tomadas en una finca del departamento del Cesar y análisis de resultados

6.1.2.1 Caracterización física, química y microbiológica de la muestra de agua residual tomadas en una finca del departamento del Cesar

La caracterización física, química y microbiológica se realizó en el laboratorio de la Universidad Popular del Cesar, sede Valledupar, empleando métodos estandarizados y equipos previamente calibrados, con el fin de garantizar la confiabilidad y precisión de los resultados obtenidos.

Los análisis se llevaron a cabo sobre las muestras recolectadas en los tres puntos de muestreo (antes del vertimiento, en el vertimiento y después del vertimiento), siguiendo los lineamientos técnicos establecidos para el estudio de calidad de agua. Se evaluaron parámetros clave como temperatura, DBO5, DQO, pH, conductividad, turbidez, alcalinidad y dureza, los cuales permiten determinar las condiciones física, química y microbiológica del sistema hídrico y la influencia del vertimiento agrícola sobre el mismo, en relación con la normativa vigente (Resolución 0631 de 2015).

La medición de los parámetros se realizó mediante técnicas instrumentales y volumétricas. La temperatura se determinó utilizando un termómetro calibrado; DBO5

mediante incubación y un oxímetro, DQO mediante un digestor y titulación, el pH mediante un pH-metro; la conductividad con un conductímetro; la turbidez con un turbidímetro. Por su parte, la alcalinidad y la dureza se determinaron a través de métodos de titulación, empleando reactivos específicos para cada caso.

Los resultados obtenidos permiten establecer una comparación entre los diferentes puntos de muestreo, evidenciando las variaciones en la calidad del agua asociadas a la descarga del efluente agrícola. Cabe destacar que la muestra correspondiente al punto de vertimiento se consideró como referencia para la evaluación del sistema de filtración, al representar el agua residual sin dilución. En el anexo 2 se presentan evidencias sobre la caracterización inicial.

Figura 4. *Proceso de caracterización inicial*





Fuente: Fotografía tomada por las autoras, 2026

Los resultados obtenidos de la caracterización inicial se presentan en la Tabla 5, los cuales constituyen la línea base para la evaluación de la eficiencia del sistema de filtración con carbón activado a partir de cáscaras de coco.



Tabla 5. Caracterización inicial de las muestras de agua residual de la temporada seca

Temporada seca					
Parámetro	Unidad	P1 Antes del vertimiento	P2 Vertimiento	P3 Después del vertimiento	Límite Res. 0631 de 2015
Temperatura	°C	26.9	27.8	27.3	≤ 40 °C
pH	Unidades	7.2	6.5	6.8	6.0 – 9.0
Conductividad	μS/cm	480	1350	920	No establece límite
Turbidez	NTU	35	185	110	No establece límite
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	140	210	180	No establece límite
Dureza	mg CaCO ₃ /L	180	320	250	No establece límite
DBO5	mg/L O ₂	35	180	90	≤ 50 mg/L
DQO	mg/L O ₂	80	320	160	≤ 150 mg/L

Nota: La Resolución 0631 de 2015 no fija valores máximos permisibles para parámetros como conductividad, turbidez, alcalinidad y dureza en este tipo de vertimientos; por ello se reportan únicamente como parámetros de caracterización

Tabla 6. Caracterización inicial de las muestras de agua residual de la temporada de lluvia

Temporada de lluvia					
Parámetro	Unidad	P1 Antes del vertimiento	P2 Vertimiento	P3 Después del vertimiento	Límite Res. 0631 de 2015
Temperatura	°C	24.8	25.6	25.1	≤ 40 °C
pH	Unidades	7.0	6.3	6.6	6.0 – 9.0
Conductividad	μS/cm	410	1180	790	No establece límite
Turbidez	NTU	78	320	210	No establece límite
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	125	190	160	No establece límite
Dureza	mg CaCO ₃ /L	160	285	220	No establece límite
DBO5	mg/L O ₂	50	240	130	≤ 50 mg/L
DQO	mg/L O ₂	110	410	220	≤ 150 mg/L

Nota: La Resolución 0631 de 2015 no fija valores máximos permisibles para parámetros como conductividad, turbidez, alcalinidad y dureza en este tipo de vertimientos; por ello se reportan únicamente como parámetros de caracterización

6.1.2.2 Análisis de los resultados obtenidos

Temporada seca

Los resultados obtenidos en la caracterización física, química y microbiológica evidencian variaciones significativas en la calidad del agua entre los puntos de muestreo, lo que permite identificar la influencia directa del vertimiento agrícola sobre el cuerpo hídrico receptor.

En el punto ubicado antes del vertimiento, los valores registrados reflejan condiciones relativamente estables del agua, con niveles moderados de conductividad ($480 \mu\text{S/cm}$) y turbidez (35 NTU), lo cual es característico de aguas superficiales con baja intervención antrópica. El pH cercano a la neutralidad (7.2) sugiere condiciones químicas equilibradas, favorables para la vida acuática (APHA, 2017), cumpliendo además con el rango permitido por la Resolución 0631 de 2015, el cual establece valores entre 6.0 y 9.0 unidades de pH. Para los parámetros de conductividad y turbidez, la normativa no establece límites máximos permisibles específicos.

En contraste, en el punto correspondiente al vertimiento, se observa un incremento considerable en la mayoría de los parámetros analizados. La conductividad alcanza valores de $1350 \mu\text{S/cm}$, lo cual indica una alta presencia de sales disueltas, comúnmente asociadas al uso de fertilizantes y agroquímicos en actividades agrícolas (García, 2020). De igual manera, el aumento de la turbidez (185 NTU) evidencia una elevada carga de sólidos suspendidos y materia orgánica, posiblemente derivada del arrastre de suelos, residuos vegetales y compuestos orgánicos presentes en el agua

residual agrícola (Pérez et al., 2020). Aunque la Resolución 0631 de 2015 no fija límites específicos para conductividad y turbidez, los valores obtenidos reflejan un deterioro importante en la calidad del agua asociado al vertimiento agrícola.

El pH en este punto (6.5) presenta una ligera tendencia hacia la acidez, lo cual puede estar relacionado con procesos de descomposición de materia orgánica y la presencia de insumos agrícolas, como fertilizantes nitrogenados, que pueden alterar las condiciones químicas del agua (FAO, 2013). No obstante, este valor cumple con el rango permitido por la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos. Asimismo, los valores de alcalinidad (210 mg CaCO_3/L) y dureza (320 mg CaCO_3/L) indican una alta concentración de carbonatos y cationes como calcio y magnesio, típicos de suelos agrícolas y sistemas de riego intensivo. Para estos parámetros, la normativa ambiental colombiana no establece límites máximos permisibles específicos.

Por su parte, en el punto ubicado después del vertimiento, se observa una disminución en los valores de los parámetros evaluados, como la conductividad (920 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y turbidez (110 NTU), lo cual puede atribuirse a procesos de dilución y dispersión en el cuerpo hídrico receptor. No obstante, estos valores permanecen superiores a los registrados antes del vertimiento, lo que evidencia un impacto persistente del efluente sobre la calidad del agua (Pérez et al., 2020). Aunque la Resolución 0631 de 2015 no establece límites específicos para estos parámetros, los resultados continúan evidenciando alteraciones en las condiciones fisicoquímicas del recurso hídrico.

Además, los valores de DBO5 y DQO en comparación con aguas arriba y aguas abajo aumentaron considerablemente en el punto de vertimiento tanto en la temporada seca como en la de lluvia, indicando una mayor presencia de materia orgánica y contaminantes en el agua residual agrícola. En temporada seca, la DBO5 alcanzó 180 mg/L O₂ y la DQO 320 mg/L O₂, superando ampliamente los límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015, correspondientes a 50 mg/L O₂ para DBO5 y 150 mg/L O₂ para DQO. Sin embargo, las concentraciones fueron menores en comparación con la temporada lluviosa, debido posiblemente a una menor movilización de residuos y sedimentos hacia el cuerpo hídrico.

Finalmente, estos resultados confirman que el vertimiento agrícola genera una alteración significativa en las características físicas, químicas y microbiológicas del agua, incrementando la carga de contaminantes y afectando la calidad del recurso hídrico, coincidiendo con lo reportado en estudios sobre aguas residuales agrícolas, donde se destaca la presencia de sólidos suspendidos, nutrientes y sales disueltas como principales factores de deterioro de la calidad del agua (FAO, 2013). Asimismo, el incumplimiento de los límites establecidos para DBO5 y DQO en la Resolución 0631 de 2015 evidencia la necesidad de implementar medidas de manejo y tratamiento para reducir el impacto ambiental generado por este tipo de vertimientos agrícolas.

Desde el punto de vista normativo, los resultados evidencian que, aunque parámetros como temperatura y pH cumplen con los valores establecidos en la Resolución 0631 de 2015 en los tres puntos evaluados, los indicadores de contaminación

orgánica presentan un comportamiento diferente. En el punto de vertimiento, la DBO_5 registró una concentración de 180 mg/L O_2 y la DQO de 320 mg/L O_2 , valores que superan en más de tres y dos veces, respectivamente, los límites máximos permisibles establecidos por la normativa (50 mg/L O_2 para DBO_5 y 150 mg/L O_2 para DQO). Este incumplimiento demuestra que el agua residual agrícola descargada posee una elevada carga de materia orgánica biodegradable y compuestos oxidables, lo que puede generar disminución del oxígeno disuelto en el cuerpo receptor, alteración de los procesos biológicos acuáticos y deterioro de la calidad ambiental del recurso hídrico. Aunque aguas abajo se observa una reducción de estos parámetros debido a procesos naturales de dilución, los valores continúan siendo superiores a los registrados antes del vertimiento, evidenciando que el impacto del efluente persiste y que el vertimiento no cumple plenamente con los requisitos ambientales establecidos para su descarga.

En términos generales, la evaluación de la temporada seca permite concluir que el vertimiento agrícola genera un deterioro significativo de la calidad fisicoquímica del agua, reflejado en el aumento de la conductividad, turbidez, alcalinidad, dureza, DBO_5 y DQO en el punto de descarga. Aunque algunos parámetros regulados, como la temperatura y el pH, cumplen con los criterios establecidos por la Resolución 0631 de 2015, el incumplimiento de los límites permisibles para DBO_5 y DQO evidencia que el vertimiento presenta una carga contaminante que puede afectar la capacidad de autodepuración del cuerpo hídrico receptor, por lo que se requiere la implementación de medidas de tratamiento y control antes de su disposición final.

Temporada de lluvia

Los resultados obtenidos durante la temporada de lluvias evidencian variaciones importantes en las características fisicoquímicas del agua, asociadas principalmente al incremento de la escorrentía superficial y al arrastre de sedimentos, materia orgánica y residuos provenientes de las actividades agrícolas hacia el cuerpo hídrico receptor.

En el punto ubicado antes del vertimiento, los parámetros registrados muestran condiciones relativamente conservadas del agua, aunque con valores de turbidez (78 NTU) superiores a los observados en temporada seca. Este comportamiento puede relacionarse con el aporte natural de sedimentos y partículas suspendidas generado por las precipitaciones y el arrastre superficial propio de las épocas de lluvia (Metcalf y Eddy, 2014). Asimismo, el pH se mantuvo cercano a la neutralidad (7.0), indicando condiciones químicas relativamente estables para el ecosistema acuático (APHA, 2017) y cumpliendo con el rango permitido por la Resolución 0631 de 2015, el cual establece valores entre 6.0 y 9.0 unidades de pH.

En el punto correspondiente al vertimiento agrícola, se observó un incremento significativo en los valores de turbidez (320 NTU), reflejando una elevada carga de sólidos suspendidos, materia orgánica y residuos provenientes del lavado de suelos agrícolas y zonas de cultivo. Según la FAO (2013), durante los periodos de lluvia se incrementa el transporte de nutrientes, sedimentos y contaminantes agrícolas hacia las fuentes hídricas debido al efecto de la escorrentía superficial. Aunque la Resolución 0631 de 2015 no establece límites máximos permisibles específicos para turbidez, este

incremento evidencia un deterioro importante en la calidad del agua asociado al vertimiento agrícola.

Aunque la conductividad registrada en este punto (1180 $\mu\text{S}/\text{cm}$) fue ligeramente inferior a la obtenida en temporada seca, los valores continúan siendo elevados, indicando la presencia de sales disueltas y compuestos químicos asociados al uso de fertilizantes y agroquímicos (García, 2020). Esta disminución relativa puede atribuirse al efecto de dilución ocasionado por el aumento del caudal durante las precipitaciones. Sin embargo, la Resolución 0631 de 2015 no establece un valor límite específico para este parámetro, aunque su incremento representa un indicador de contaminación por sustancias disueltas.

El pH presentó un valor de 6.3, mostrando una ligera tendencia hacia condiciones ácidas, posiblemente relacionadas con procesos de descomposición de materia orgánica y lixiviación de compuestos nitrogenados presentes en el suelo agrícola (FAO, 2013). No obstante, este valor aún cumple con los límites establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos, los cuales se encuentran entre 6.0 y 9.0. De igual forma, los valores de alcalinidad (190 mg CaCO_3/L) y dureza (285 mg CaCO_3/L) evidencian la presencia de minerales y compuestos disueltos provenientes tanto del suelo como de las actividades agrícolas desarrolladas en la zona. Para estos parámetros, la normativa ambiental colombiana no establece límites máximos permisibles específicos.

Por su parte, en el punto ubicado después del vertimiento se observó una disminución parcial de algunos parámetros, como la conductividad (790 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y

turbidez (210 NTU), posiblemente debido a procesos de dilución, sedimentación y dispersión dentro del cuerpo hídrico receptor. Sin embargo, los valores continúan siendo superiores a los registrados antes del vertimiento, lo que demuestra que el impacto generado por el efluente agrícola persiste aguas abajo (Torres et al., 2024). Aunque la normativa no fija límites específicos para estos parámetros, los resultados reflejan alteraciones importantes en la calidad fisicoquímica del agua.

Además, se evidenció un incremento considerable en los valores de DBO5 y DQO, ocasionando un mayor nivel de contaminación en el agua, ya que las precipitaciones favorecieron el transporte de materia orgánica hacia el punto de vertimiento, aumentando así la carga contaminante en el agua residual. Los valores registrados de DBO5 (240 mg/L O₂) y DQO (410 mg/L O₂) superan ampliamente los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos agrícolas, correspondientes a 50 mg/L O₂ para DBO5 y 150 mg/L O₂ para DQO, evidenciando un incumplimiento normativo y una alta carga de contaminación orgánica en el efluente evaluado.

Finalmente, los resultados obtenidos durante la temporada de lluvias permiten establecer que las precipitaciones intensifican el transporte de contaminantes agrícolas hacia el sistema hídrico, incrementando principalmente los niveles de turbidez y sólidos suspendidos. Asimismo, los elevados valores de DBO5 y DQO demuestran que durante esta temporada el vertimiento no cumple con los límites establecidos por la Resolución

0631 de 2015, generando un impacto significativo sobre la calidad del cuerpo de agua receptor.

Desde la perspectiva normativa, aunque los parámetros de temperatura y pH cumplieron con los valores establecidos por la Resolución 0631 de 2015 en los tres puntos de muestreo, los resultados de DBO₅ y DQO evidencian un incumplimiento significativo en el punto de vertimiento. Las concentraciones registradas de DBO₅ (240 mg/L O₂) y DQO (410 mg/L O₂) superan ampliamente los límites máximos permisibles establecidos por la normativa colombiana para este tipo de vertimientos (50 mg/L O₂ y 150 mg/L O₂, respectivamente). Este comportamiento indica una elevada carga de materia orgánica biodegradable y sustancias químicamente oxidables, las cuales pueden generar una disminución del oxígeno disponible en el medio acuático, afectar los procesos biológicos naturales y comprometer el equilibrio ecológico del cuerpo receptor. Aunque aguas abajo se observa una reducción de estos parámetros como consecuencia de procesos de dilución y autodepuración, las concentraciones continúan siendo superiores a las registradas antes del vertimiento, lo que demuestra que el impacto ambiental persiste más allá del punto de descarga.

En términos generales, la temporada de lluvias evidenció una mayor afectación de la calidad del agua en comparación con la temporada seca, debido al incremento de la escorrentía superficial y al arrastre de sedimentos, nutrientes y materia orgánica provenientes de las áreas agrícolas. Si bien parámetros como temperatura y pH permanecieron dentro de los rangos permitidos por la Resolución 0631 de 2015, las

concentraciones registradas de DBO_5 y DQO en el punto de vertimiento superaron ampliamente los límites máximos permisibles, confirmando el incumplimiento normativo del efluente evaluado. Estos resultados permiten concluir que las precipitaciones intensifican la movilización de contaminantes hacia el recurso hídrico, aumentando la carga orgánica y el riesgo de deterioro ambiental del cuerpo receptor, por lo que resulta necesario implementar estrategias de manejo y tratamiento que permitan reducir la contaminación generada por las actividades agrícolas antes de la descarga del agua residual.

6.2 Desarrollo del sistema filtrante de carbón activado utilizando cáscaras de coco como materia prima para el tratamiento de agua residual

6.2.1 Compra y acondicionamiento del carbón activado de coco

Inicialmente, se tenía contemplada la elaboración del carbón activado en laboratorio utilizando cáscaras de coco como materia prima. Sin embargo, debido a criterios de desarrollo experimental, por recomendación de docentes se realizó la compra del carbón activado de coco ya procesado, garantizando que el material cumpliera con las características necesarias para su utilización en el sistema de tratamiento de agua residual agrícola.

El carbón activado utilizado en la investigación fue adquirido en presentación comercial con sus especificaciones que se pueden encontrar en la tabla 2, seleccionado por sus propiedades adsorbentes, alta porosidad y capacidad de remoción de contaminantes presentes en aguas residuales. La elección de este material se realizó

considerando su origen vegetal y su eficiencia reportada en procesos de filtración y adsorción.

Posteriormente, el material fue transportado y almacenado en condiciones adecuadas, en recipientes herméticos y en un ambiente seco y libre de humedad, con el fin de conservar sus propiedades fisicoquímicas hasta su utilización experimental. Antes de su incorporación al sistema filtrante, el carbón activado fue sometido a un proceso de acondicionamiento, el cual consistió en un lavado con agua destilada para eliminar partículas finas, impurezas superficiales y posibles residuos generados durante su fabricación y almacenamiento. Posteriormente, se realizó un secado al aire libre por medio de los rayos ultravioletas durante 24 horas, con el propósito de eliminar humedad residual y garantizar condiciones homogéneas para su aplicación en el proceso de filtración.

Finalmente, el carbón activado acondicionado fue almacenado nuevamente en recipientes herméticos hasta el momento de su utilización en el sistema filtrante diseñado para el tratamiento del agua residual agrícola.

Tabla 7. *Etapas del acondicionamiento del carbón activado de coco*

Etapas	Descripción del proceso	Condiciones aplicadas	Finalidad
---------------	--------------------------------	------------------------------	------------------

Compra del material	Adquisición de carbón activado de coco comercial	Selección de material adsorbente de origen vegetal	Garantizar disponibilidad y calidad del material
Transporte y almacenamiento	Conservación del material antes de su uso	Recipientes herméticos y ambiente seco	Mantener propiedades adsorbentes
Lavado	Eliminación de partículas finas e impurezas	Lavado con agua destilada	Limpiar y estabilizar el material
Secado	Eliminación de humedad residual	Secado al aire libre durante 24 h	Garantizar condiciones homogéneas
Almacenamiento final	Conservación hasta su utilización	Ambiente seco y libre de contaminantes	Preservar propiedades fisicoquímicas

Fuente: Elaboración propia

Figura 5. *Resultado final del carbón activado de coco*



Fuente: Fotografía tomada por las autoras, 2026

6.2.2 Construcción del sistema de filtración de carbón activado

La construcción del sistema de filtración se realizó tomando como base metodológica los lineamientos propuestos por la Universidad Nacional de Colombia (2024) y Torres (2024), adaptándolos a las condiciones experimentales del estudio y al uso de materiales de fácil acceso.

El sistema fue diseñado bajo el principio de filtración en flujo descendente, empleando recipientes cilíndricos plásticos con capacidad aproximada de 8 litros. Con el propósito de evaluar la eficiencia de diferentes configuraciones filtrantes en el tratamiento del agua residual agrícola, se construyeron tres filtros experimentales independientes, utilizando combinaciones de grava, arena y carbón activado de cáscara de coco como medio adsorbente principal.

Cada filtro fue estructurado en capas, organizadas estratégicamente para favorecer la retención de sólidos suspendidos, la disminución de turbidez y el proceso de adsorción de contaminantes presentes en el agua residual agrícola.

El primer sistema filtrante (T1) estuvo conformado por una capa de grava gruesa en la parte inferior, seguida de una capa de arena y una capa superior de carbón activado, buscando integrar procesos de sedimentación, filtración física y adsorción química dentro de una misma unidad experimental.

El segundo sistema (T2) fue construido utilizando una capa de grava y una capa de carbón activado, con el fin de evaluar el comportamiento del material adsorbente bajo una configuración simplificada, reduciendo el uso de medios filtrantes intermedios como la arena.

Por su parte, el tercer sistema (T3) estuvo compuesto únicamente por carbón activado de cáscara de coco, permitiendo analizar de manera directa la capacidad adsorbente del material frente a los contaminantes presentes en el agua residual agrícola.

Adicionalmente, en cada unidad filtrante se incorporó una malla de soporte entre las capas, cuya función fue evitar la migración del material filtrante y facilitar la estabilidad estructural del sistema durante el proceso experimental.

Figura 6. *Sistema de filtración con carbón activado en configuración experimental*



Fuente: Elaborado por las autoras, 2026

El sistema opera mediante flujo gravitacional, donde el agua residual ingresa por la parte superior del recipiente, atraviesa las distintas capas filtrantes y finalmente es recolectada a través de una válvula de salida ubicada en la parte inferior, permitiendo la obtención del agua tratada.

Tabla 8. *Componentes del sistema de filtración y características técnicas*

Componente	Función	Especificaciones técnicas	Material
Recipiente cilíndrico	Contener las capas filtrantes	Capacidad aproximada: 8 L	Plástico reciclado
Entrada de agua	Permitir el ingreso del agua al sistema	Flujo gravitacional superior	Abertura superior

Capa de grava (T1 y T2)	Retención de sólidos gruesos y soporte del sistema	Profundidad: 7 cm (T1) y 12 cm (T2)	Grava natural
Capa de arena (T1)	Retención de sólidos finos	Profundidad: 6 cm	Arena silíceas
Malla filtrante	Separación de capas y retención de partículas	Porosidad fina	Tela/malla sintética
Carbón activado (T1)	Adsorción de contaminantes	Profundidad del lecho: 6 cm	Carbón activado de cáscara de coco
Carbón activado (T2)	Adsorción de contaminantes	Profundidad del lecho: 7 cm	Carbón activado de cáscara de coco
Carbón activado (T3)	Adsorción de contaminantes	Profundidad del lecho: 15.5 cm	Carbón activado de cáscara de coco
Sistema de salida	Recolección del agua tratada	Válvula inferior	Plástico (grifo)

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con Torres (2024), este tipo de sistemas de filtración con carbón activado presenta múltiples ventajas, entre ellas la reducción de turbidez, la remoción de compuestos orgánicos y la mejora de las características organolépticas del agua.

Asimismo, estos sistemas se destacan por su bajo costo, facilidad de construcción y posibilidad de reutilización, convirtiéndose en una alternativa viable bajo enfoques de ecoeficiencia y producción más limpia.

En ese sentido, la implementación de tres configuraciones filtrantes diferentes permitió comparar el comportamiento del carbón activado tanto de manera individual como combinado con materiales de soporte y prefiltración, como la grava y la arena, evaluando así su influencia sobre la eficiencia del tratamiento del agua residual agrícola.

6.3 Determinación del grado de remoción de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos obtenido del piloto a base de carbón activado de cascara de coco, con base en la normatividad legal vigente sobre límites máximos permisibles de vertimientos de aguas residuales (Res 0631/2015)

6.3.1 Proceso de filtración

El proceso de filtración se llevó a cabo utilizando los tres sistemas filtrantes previamente contruidos, empleando como afluente el agua residual agrícola recolectada en el punto de vertimiento. Este procedimiento se desarrolló bajo condiciones controladas, con el propósito de evaluar la eficiencia de diferentes configuraciones de carbón activado de cáscara de coco en la remoción de contaminantes presentes en el agua residual.

Inicialmente, se realizó la preparación de cada sistema, verificando la correcta disposición de los materiales filtrantes y el adecuado funcionamiento de las válvulas de salida. Así mismo, se comprobó que no existieran fugas y que el flujo del agua fuera uniforme en las tres unidades experimentales.

El primer sistema filtrante (T1) estuvo conformado por una capa de grava, una capa de arena y una capa de carbón activado, organizadas de forma estratificada para favorecer la retención de sólidos gruesos, sólidos finos y contaminantes disueltos. El segundo sistema (T2) estuvo compuesto por una capa de grava y una capa de carbón activado, mientras que el tercer sistema (T3) fue diseñado únicamente con carbón activado de cáscara de coco, permitiendo evaluar de manera directa la capacidad adsorbente del material.

Posteriormente, se procedió a la alimentación de cada filtro, adicionando el agua residual agrícola en la parte superior de las unidades experimentales bajo un sistema de flujo gravitacional. Para garantizar condiciones comparables entre tratamientos, se mantuvo un volumen similar de agua y un procedimiento uniforme durante el proceso de filtración.

El tiempo de contacto entre el agua residual y el material filtrante se estableció en un rango aproximado de 1 hora, tomando como referencia lo planteado por Torres (2024), con el fin de favorecer los procesos de adsorción y remoción de contaminantes físicos, químicos y microbiológicos presentes en el agua residual agrícola.

Durante el proceso, el agua atravesó progresivamente las diferentes capas filtrantes, permitiendo la disminución de sólidos suspendidos, turbidez y otros compuestos asociados al vertimiento agrícola. En el caso del filtro conformado únicamente por carbón activado (T3), la remoción se atribuyó principalmente a los procesos de adsorción superficial desarrollados por el material carbonoso.

Finalmente, el agua tratada fue recolectada mediante la válvula inferior de cada sistema y almacenada en recipientes estériles para su posterior análisis físico, químico y microbiológico, permitiendo comparar los resultados obtenidos con la muestra inicial y con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015.

En la Tabla 9 se presentan las condiciones operativas del proceso de filtración.

Tabla 9. *Condiciones operativas del proceso de filtración*

Parámetro	Descripción
Tipo de sistema	Filtro de lecho fijo en flujo descendente
Tipo de flujo	Gravitacional
Agua tratada	Agua residual agrícola (punto de vertimiento)
Volumen por ensayo	2 litros por unidad filtrante
Tiempo de contacto	1 hora
Pretratamiento	Filtración con grava y arena (externo al sistema)
Tipo de filtración	Física (retención de sólidos) y adsorción (carbón activado)
Recolección	Salida inferior mediante válvula
Destino de muestra	Análisis físico y químico post-tratamiento

Fuente: Elaboración propia

El proceso se realizó por triplicado para cada unidad experimental, con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

6.3.2 Cálculo de los parámetros hidráulicos y operativos del sistema filtrante

En este apartado se determinaron los principales parámetros hidráulicos y operativos de las unidades filtrantes utilizadas durante el tratamiento del agua residual

agrícola en temporada seca, con el propósito de evaluar el comportamiento del sistema y las condiciones de operación de cada tratamiento experimental.

Los parámetros calculados incluyeron el caudal, área transversal, carga superficial, carga hidráulica, carga orgánica, volumen útil del filtro, tiempo de retención hidráulica y espesor del medio filtrante, tomando como referencia las dimensiones físicas de las unidades experimentales y las condiciones operativas establecidas durante el proceso de filtración.

Los cálculos se realizaron considerando un recipiente cilíndrico con diámetro interno de 24 cm, un volumen de tratamiento de 2 L por ensayo y un tiempo de retención hidráulica calculado para cada uno de los sistemas filtrantes.

a) Área transversal del filtro

El área transversal del sistema filtrante se determinó mediante la ecuación del área de un círculo:

$$A_t = \pi * r^2$$

Dónde:

- A_t = área transversal (m^2)
- r = radio interno del filtro (m)

Considerando:

- diámetro = 24 cm
- radio = 12 cm = 0.12 m

Se obtuvo:

$$A_t = 3,1416 * (0,12)^2 = 0.0452 \, m^2$$

Por tratarse de un sistema cilíndrico, el área superficial corresponde al mismo valor del área transversal.

b) Caudal de operación

El caudal experimental se calculó a partir del volumen tratado y el tiempo de retención hidráulica establecido para cada sistema filtrante, obteniendo tres resultados.

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

Dónde:

- Q = caudal (L/s)
- V = volumen tratado (L)
- t = tiempo (s)

Considerando:

- volumen = 2 L
- tiempo = h

Tabla 10. *Cálculo de caudal para cada sistema filtrante*

	volumen (L)	tiempo (s)	caudal (l/s)
FILTRO 1	2	22.83	0.0876
FILTRO 2	2	15.93	0.126
FILTRO 3	2	17.79	0.112

Fuente:

Elaboración

propia, Excel.

c) Carga hidráulica

La carga hidráulica se calculó mediante la relación entre el volumen, área transversal y tiempo de cada sistema filtrante, obteniendo tres resultados.

$$C_h = \frac{V}{A * t}$$

Dónde:

- C_h = carga hidráulica (m/s)
- t = tiempo (s)
- A = área transversal (m^2)
- V = volumen (m^3)

Tabla 11. *Cálculo de carga hidráulica de cada sistema filtrante*

	Volumen (m3)	Tiempo (s)	Área superficial (m2)	Carga hidráulica (m/s)
FILTRO 1	0.002	22.83	0.0452	0.00194
FILTRO 2	0.002	15.93	0.0452	0.00278
FILTRO 3	0.002	17.79	0.0452	0.00249

Fuente: Elaboración propia, Excel.

Este valor indica una velocidad de filtración lenta o moderada, favoreciendo los procesos de adsorción y retención de contaminantes en el medio filtrante.

d) Tiempo de retención hidráulica (TRH)

El tiempo de retención hidráulica fue establecido experimentalmente en 1 hora, con el propósito de favorecer el contacto entre el agua residual agrícola y los materiales filtrantes, especialmente el carbón activado de cáscara de coco, permitiendo optimizar los procesos de adsorción de contaminantes físicos y químicos presentes en el afluente.

También se calculó el tiempo de retención hidráulica, con el fin de comparar valores; esto se hizo a partir de la siguiente formula:

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

Donde:

Q= caudal (l/s)

V= Volumen (m^3)

Tabla 12. *Cálculo del tiempo de retención hidráulico de cada sistema filtrante.*

	Volumen (m3)	Caudal (l/s)	TRH (S)
FILTRO 1	0.002	0.00009	22.830
FILTRO 2	0.002	0.00013	15.930
FILTRO 3	0.002	0.00011	17.790

Fuente: Elaboración propia, Excel.

e) Espesor del medio filtrante

Los espesores de las capas filtrantes variaron según cada tratamiento experimental, tal como se presenta en la Tabla 12.

Tabla 13. *Espesor de los medios filtrantes empleados en cada tratamiento*

Tratamiento	Material filtrante	Espesor
T1	Grava	7 cm
T1	Arena sílicea	6 cm
T1	Carbón activado	6 cm
T2	Grava	12 cm

T2	Carbón activado	7 cm
T3	Carbón activado	15.5 cm

Fuente: Elaboración propia.

f) Resumen de parámetros hidráulicos calculados

Tabla 14. *Parámetros hidráulicos y operativos del sistema filtrante*

Parámetro	Valor
Diámetro interno del filtro	24 cm
Radio interno	0,12 m
Área transversal	0,0452 m ²
Volumen tratado	2 L
Tiempo de retención hidráulica de F1, F2, F3 (s)	F1: 22.98, F2: 16.7, F3: 18.18
Caudal de F1, F2 y F3 (l/s)	F1: 0.0876, F2: 0.126, F3: 0.112
Carga hidráulica de F1, F2, F3 (m/s)	F1: 0.00194, F2: 0.00278, F3: 0.00249
Tipo de flujo	Gravitacional descendente

Fuente: Elaboración propia.

A partir de los antecedentes revisados, se evidencia que los materiales de origen orgánico, especialmente aquellos derivados del coco, presentan un alto potencial como medios filtrantes y adsorbentes en el tratamiento de aguas contaminadas. Torres (2024) reportó eficiencias de remoción de hasta el 90 % utilizando carbón activado elaborado a partir del endocarpio de coco, destacando su elevada capacidad de adsorción frente a

contaminantes orgánicos como el azul de metileno y el fenol. De manera similar, Rondón et al. (2020) demostraron que la cáscara de coco permitió disminuir significativamente parámetros como la turbidez, y la presencia de metales pesados en el agua tratada.

Así mismo, Reyes (2020) encontró que la fibra de coco presentó una mayor eficiencia en la remoción de demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y sólidos suspendidos totales (SST) en comparación con otros materiales orgánicos utilizados en biofiltros, lo que evidencia la capacidad de los subproductos del coco para favorecer procesos de retención y adsorción de contaminantes presentes en aguas residuales. Por otro lado, Pérez (2020) destacó la eficacia de materiales filtrantes alternativos como la zeolita para reducir aceites, grasas y sólidos suspendidos, confirmando la importancia del uso de medios adsorbentes en sistemas de tratamiento de bajo costo.

Finalmente, estos estudios evidencian que los materiales naturales y adsorbentes constituyen una alternativa viable y sostenible para el tratamiento de aguas residuales, especialmente en sistemas de filtración de pequeña escala. Además, los resultados reportados por los diferentes autores respaldan el uso del carbón activado de cáscara de coco como material filtrante en la presente investigación, debido a su capacidad para mejorar la calidad del agua mediante procesos de adsorción y retención de contaminantes físicos y químicos.

6.3.3 Caracterización física, química y microbiológica final

6.3.3.1 Resultados de la caracterización final por tratamiento y réplica

Temporada seca

Los parámetros evaluados en el agua tratada fueron turbidez, alcalinidad y dureza, seleccionados debido a su importancia en la determinación de la calidad del agua y su relación con la presencia de sólidos suspendidos, materia orgánica y compuestos minerales disueltos. Los análisis fueron realizados utilizando los mismos métodos y equipos empleados durante la caracterización inicial, garantizando la confiabilidad y comparabilidad de los resultados obtenidos.

Los tratamientos evaluados correspondieron a las tres configuraciones filtrantes implementadas: T1 (grava, arena y carbón activado), T2 (grava y carbón activado) y T3 (carbón activado). Cada tratamiento fue analizado mediante réplicas experimentales, permitiendo evaluar la estabilidad y consistencia del proceso de filtración.

En la Tabla 15 se presentan los resultados obtenidos para cada réplica en los diferentes tratamientos durante la temporada seca, permitiendo observar el comportamiento de los sistemas filtrantes frente a la remoción de contaminantes presentes en el agua residual agrícola.



Tabla 15. Resultados físicos, químicos y microbiológicos del agua tratada por réplica y tratamiento en temporada seca

Tratamiento	Réplica	pH	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Turbidez (NTU)	Alcalinidad (mg CaCO_3/L)	Dureza (mg CaCO_3/L)	DBO5 (mg/L O_2)	DQO (mg/L O_2)	Cumplimiento Res. 0631 de 2015
Control	—	8.6	1350	185	210	320	180	320	No cumple (DBO5 y DQO exceden límites)
T1	R1	7.2	620	48	145	205	42	78	Cumple
T1	R2	7.3	590	45	140	198	38	72	Cumple
T1	R3	7.4	560	42	138	195	35	68	Cumple
T2	R1	7.8	840	72	165	240	70	130	No cumple (DBO5 supera límite)

T2	R2	7.7	810	68	160	232	66	122	No cumple (DBO5 supera límite)
T2	R3	7.6	780	65	158	225	62	118	No cumple (DBO5 supera límite)
T3	R1	8.0	720	88	150	215	58	105	No cumple (DBO5 supera límite)
T3	R2	7.9	690	84	145	208	54	98	No cumple (DBO5 supera límite)
T3	R3	7.8	660	80	142	200	50	92	Cumple

Límite Res.	—	6.0 — 9.0	No establece límite	No establece límite	No establece límite	No establece límite	≤ 50	≤ 150	—
0631/2015									

Nota: De acuerdo con la Resolución 0631 de 2015, los parámetros críticos para evaluar el cumplimiento en este caso corresponden principalmente a DBO5 y DQO. Los resultados muestran que el tratamiento T1 presentó la mayor eficiencia en la remoción de carga contaminante, logrando que todas sus réplicas cumplieran con los límites máximos permisibles establecidos para vertimientos agrícolas.



Los resultados obtenidos evidencian que los tres sistemas de filtración implementados lograron reducir los valores de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos evaluados en el agua residual agrícola; sin embargo, la eficiencia de remoción varió de acuerdo con la composición de cada filtro.

El tratamiento T1, conformado por grava, arena y carbón activado, presentó los menores valores de turbidez en comparación con los demás tratamientos, evidenciando una mayor eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos y materia orgánica, lo que puede atribuirse a la acción conjunta de las capas filtrantes, donde la grava favorece la retención de partículas gruesas, la arena contribuye a la disminución de sólidos finos y el carbón activado actúa mediante procesos de adsorción sobre compuestos disueltos y materia orgánica (Metcalf y Eddy, 2014). Los valores de turbidez obtenidos en este tratamiento oscilaron entre 42 y 48 NTU. Así mismo, los valores de pH registrados en T1 (7.2–7.4) cumplieron con el rango establecido por la Resolución 0631 de 2015 (6.0–9.0), mientras que los valores de DBO_5 (35–42 mg/L O_2) y DQO (68–78 mg/L O_2) se mantuvieron por debajo de los límites máximos permisibles de 50 mg/L O_2 y 150 mg/L O_2 respectivamente, evidenciando cumplimiento normativo para estos parámetros.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Rondón et al. (2020), quienes demostraron que la utilización de materiales derivados del coco como medio filtrante permitió disminuir significativamente la turbidez, el color y la presencia de contaminantes en el agua tratada. De igual manera, Torres (2024) reportó altas eficiencias de remoción mediante el uso de carbón activado elaborado a partir de endocarpio de coco, alcanzando porcentajes cercanos al 90 % en la adsorción de contaminantes orgánicos,

lo cual respalda la eficiencia observada en el presente estudio para los tratamientos que incorporaron carbón activado.

En cuanto a la conductividad, los resultados evidenciaron una disminución importante en todos los tratamientos respecto al agua residual sin tratar, siendo T1 el sistema que presentó los menores valores (560–620 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Esto indica una reducción significativa de sales disueltas y compuestos iónicos presentes en el agua residual agrícola, posiblemente asociada a procesos de adsorción y retención dentro del sistema filtrante. Aunque la Resolución 0631 de 2015 no establece límites máximos permisibles específicos para conductividad, la reducción observada representa una mejora en la calidad fisicoquímica del agua tratada y una disminución de contaminantes disueltos asociados al uso de fertilizantes y agroquímicos (García, 2020).

Por su parte, el tratamiento T2, compuesto por grava y carbón activado, también evidenció una disminución importante de los parámetros analizados, aunque con menor eficiencia respecto a T1. La ausencia de la capa de arena posiblemente limitó la retención de partículas finas y sólidos suspendidos, lo cual se reflejó en valores más elevados de turbidez. No obstante, el sistema mantuvo una capacidad significativa de remoción gracias a la presencia del carbón activado, material ampliamente reconocido por su alta capacidad adsorbente frente a compuestos orgánicos y contaminantes presentes en aguas residuales (AWWA, 2012). Este comportamiento demuestra la importancia de combinar procesos de filtración física y adsorción química para optimizar la calidad del agua tratada. En este tratamiento, aunque el pH se mantuvo dentro del rango permitido por la Resolución 0631 de 2015 (7.6–7.8), los valores de DBO_5 (62–70 $\text{mg}/\text{L O}_2$)

superaron el límite máximo permisible establecido por la normativa, indicando incumplimiento para este parámetro. Sin embargo, los valores de DQO (118–130 mg/L O₂) sí cumplieron con el límite permitido de 150 mg/L O₂.

En cuanto al tratamiento T3, conformado únicamente por carbón activado de cáscara de coco, se observó una reducción considerable en parámetros como alcalinidad y dureza, evidenciando la capacidad adsorbente del material. Sin embargo, los valores de turbidez fueron superiores a los registrados en T1 y T2, posiblemente debido a la ausencia de medios de prefiltración física como grava y arena, los cuales cumplen una función importante en la retención de sólidos suspendidos (FAO, 2013). Este comportamiento demuestra que, aunque el carbón activado posee una elevada capacidad de adsorción, su eficiencia puede incrementarse cuando se combina con materiales filtrantes complementarios (Reyes, 2020). Los valores de pH en T3 (7.8–8.0) cumplieron con la Resolución 0631 de 2015; sin embargo, los valores de DBO₅ en algunas réplicas (54–58 mg/L O₂) superaron ligeramente el límite máximo permisible de 50 mg/L O₂, mientras que la DQO (92–105 mg/L O₂) permaneció dentro de los valores permitidos por la normativa ambiental.

Los resultados obtenidos en T3 guardan relación con lo expuesto por Reyes (2020), quien encontró que los materiales derivados del coco presentan una elevada capacidad para remover contaminantes asociados a la materia orgánica y sólidos suspendidos en sistemas de biofiltración. Asimismo, Pérez (2020) evidenció que el uso de materiales adsorbentes en sistemas filtrantes contribuye significativamente a la reducción de sólidos suspendidos, aceites y otros contaminantes presentes en aguas

residuales, resaltando la importancia de las configuraciones multicapa para mejorar la eficiencia global del tratamiento.

Asimismo, se evidenció una baja variabilidad entre las réplicas de cada tratamiento, indicando estabilidad operativa y adecuada reproducibilidad del sistema experimental. Las diferencias observadas entre tratamientos permiten establecer que la configuración del medio filtrante influye significativamente en la eficiencia del proceso de remoción, especialmente en parámetros asociados a sólidos suspendidos y compuestos orgánicos presentes en el agua residual agrícola (Pérez, 2020).

Los resultados obtenidos evidencian una disminución significativa de los valores de DBO₅ y DQO en todos los tratamientos evaluados, siendo el tratamiento T1 el que presentó mayor eficiencia de remoción. Esto puede atribuirse a la acción combinada de la grava, arena y carbón activado, materiales que favorecen tanto la retención de sólidos suspendidos como la adsorción de materia orgánica presente en el agua residual. Los menores valores registrados en T1 indican una reducción considerable de la carga orgánica biodegradable y de los compuestos químicamente oxidables presentes en el efluente agrícola, permitiendo además el cumplimiento de los límites establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos agrícolas.

De acuerdo con Torres (2024), los sistemas filtrantes que incorporan carbón activado presentan alta capacidad de adsorción de compuestos orgánicos, permitiendo disminuir parámetros como DBO₅ y DQO y mejorando significativamente la calidad del agua tratada. Asimismo, Rondón et al. (2020) señalan que la combinación de materiales granulares y medios adsorbentes incrementa la eficiencia de remoción de contaminantes

orgánicos en aguas residuales agrícolas, debido a procesos físicos de retención y químicos de adsorción que favorecen la depuración del efluente.

Desde el punto de vista normativo, los resultados permiten establecer diferencias claras entre los tratamientos evaluados. El tratamiento T1 fue el único que cumplió de manera consistente con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para los parámetros de pH, DBO₅ y DQO, demostrando una capacidad adecuada para reducir la carga contaminante del agua residual agrícola hasta niveles aceptables para su vertimiento. Por el contrario, aunque los tratamientos T2 y T3 lograron disminuir significativamente las concentraciones de materia orgánica respecto al agua residual sin tratar, presentaron valores de DBO₅ superiores al límite máximo permisible de 50 mg/L O₂, evidenciando que su eficiencia de remoción no fue suficiente para garantizar el cumplimiento total de la normativa ambiental. Estos resultados indican que la sola presencia de carbón activado no asegura la remoción necesaria de la carga orgánica biodegradable, siendo indispensable la incorporación de medios filtrantes complementarios que favorezcan la retención física de sólidos y materia orgánica antes de los procesos de adsorción.

En términos generales, los resultados demuestran que la configuración del sistema filtrante influye directamente en la eficiencia del tratamiento de aguas residuales agrícolas. La combinación de grava, arena y carbón activado utilizada en T1 favoreció la ocurrencia simultánea de procesos de filtración física, sedimentación y adsorción, permitiendo obtener las mayores reducciones en turbidez, conductividad, DBO₅ y DQO. En consecuencia, este tratamiento no solo presentó el mejor desempeño técnico, sino

que también fue el único que alcanzó el cumplimiento integral de los parámetros regulados por la Resolución 0631 de 2015. Por su parte, los tratamientos T2 y T3 mostraron eficiencias parciales que, aunque mejoraron considerablemente la calidad del agua residual, no garantizaron el cumplimiento total de los requisitos normativos debido a las concentraciones de DBO_5 registradas. Lo anterior permite concluir que T1 constituye la alternativa más viable para la implementación de sistemas de tratamiento de bajo costo orientados a la reducción del impacto ambiental generado por vertimientos agrícolas.



Temporada de lluvia

Tabla 16. Resultados fisicoquímicos del agua tratada por réplica y tratamiento para la temporada de lluvia

Tratamiento	Réplica	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Turbidez (NTU)	Alcalinidad (mg CaCO_3/L)	Dureza (mg CaCO_3/L)	DBO_5 (mg/L O_2)	DQO (mg/L O_2)	Cumplimiento Res. 0631 de 2015
Control	—	1180	320	190	285	240	410	No cumple
T1	R1	640	82	150	210	58	105	No cumple (DBO_5 supera límite)
T1	R2	610	78	145	205	54	98	No cumple (DBO_5 supera límite)
T1	R3	580	75	142	200	50	92	Cumple

T2	R1	860	115	165	235	92	165	No cumple (DBO ₅ y DQO superan límites)
T2	R2	830	108	160	228	88	158	No cumple (DBO ₅ y DQO superan límites)
T2	R3	800	102	158	220	82	150	No cumple (DBO ₅ supera límite)
T3	R1	760	135	155	218	74	132	No cumple (DBO ₅ supera límite)
T3	R2	730	128	150	210	70	125	No cumple (DBO ₅ supera límite)

T3	R3	700	122	148	205	66	118	No cumple (DBO ₅ supera límite)
Límite Res. 0631/2015	—	No establece límite	No establece límite	No establece límite	No establece límite	≤ 50	≤ 150	—

Fuente: Elaboración propia



Los resultados obtenidos durante la temporada de lluvias evidencian una disminución significativa en los parámetros físicos, químicos y microbiológicos evaluados después del proceso de filtración, demostrando la capacidad de los sistemas implementados para mejorar la calidad del agua residual agrícola. Sin embargo, la eficiencia de remoción presentó diferencias entre tratamientos, asociadas principalmente a la composición de cada filtro y al incremento de la carga contaminante ocasionada por las precipitaciones, las cuales favorecen el arrastre de sedimentos, materia orgánica y residuos agrícolas hacia el cuerpo hídrico (Rondón et al., 2020).

El tratamiento T1, conformado por grava, arena y carbón activado, presentó el mejor desempeño global durante la temporada de lluvias, registrando los menores valores de turbidez en comparación con los demás tratamientos. Los valores de turbidez oscilaron entre 75 y 82 NTU. Este comportamiento evidencia que la combinación de materiales filtrantes favoreció tanto la retención física de sólidos suspendidos como la adsorción de compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Según Metcalf y Eddy (2014), los sistemas multicapa permiten mejorar la eficiencia del tratamiento al integrar procesos físicos de filtración y mecanismos químicos de adsorción. Además, este tratamiento presentó los menores valores de conductividad (580–640 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indicando una disminución considerable de sales disueltas y compuestos químicos asociados a fertilizantes y agroquímicos presentes en el agua residual agrícola. Aunque la Resolución 0631 de 2015 no establece límites máximos permisibles para conductividad, la reducción observada evidencia una mejora importante en la calidad fisicoquímica del efluente tratado.

Así mismo, el tratamiento T1 registró los menores valores de DBO_5 y DQO respecto a los demás sistemas evaluados, evidenciando una mayor eficiencia en la remoción de materia orgánica biodegradable y compuestos químicamente oxidables. Los valores de DBO_5 oscilaron entre 50 y 58 mg/L O_2 , mientras que la DQO presentó valores entre 92 y 105 mg/L O_2 . Estos resultados indican que la mayoría de las réplicas de T1 lograron aproximarse o cumplir con los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015 para vertimientos agrícolas, especialmente para DQO (≤ 150 mg/L O_2), mientras que una de las réplicas alcanzó el límite permitido para DBO_5 (≤ 50 mg/L O_2). Esto demuestra una alta eficiencia del sistema incluso bajo condiciones de elevada carga contaminante ocasionada por las lluvias.

Los resultados obtenidos en este tratamiento guardan relación con lo reportado por Rondón et al. (2020), quienes demostraron que el uso de materiales derivados del coco como medio filtrante permitió reducir significativamente la turbidez, y otros contaminantes presentes en el agua. Así mismo, Torres (2024) reportó altas eficiencias de remoción mediante carbón activado elaborado a partir de endocarpio de coco, alcanzando porcentajes cercanos al 90 % en procesos de adsorción de contaminantes orgánicos, lo que respalda el comportamiento observado en el presente estudio para los tratamientos que incorporaron carbón activado.

En el tratamiento T2, compuesto por grava y carbón activado, también se observó una reducción importante de los contaminantes respecto al agua sin tratar; no obstante, los valores de turbidez permanecieron superiores a los registrados en T1. La ausencia de una capa de arena posiblemente disminuyó la capacidad de retención de partículas

finas transportadas por escorrentía durante la temporada de lluvias, condición que incrementa la presencia de sólidos suspendidos en el agua residual agrícola (FAO, 2013). A pesar de ello, el tratamiento mantuvo una eficiencia considerable gracias a la capacidad adsorbente del carbón activado, ampliamente reconocida en sistemas de tratamiento de agua residual (AWWA, 2012).

Los valores de conductividad registrados en T2 (800–860 $\mu\text{S/cm}$) reflejan una disminución respecto al control, aunque menor en comparación con T1, indicando que el sistema logró remover parcialmente compuestos disueltos presentes en el agua residual. De igual manera, los valores de DBO_5 (82–92 mg/L O_2) y DQO (150–165 mg/L O_2) evidenciaron una reducción significativa de la carga contaminante; sin embargo, la mayoría de los resultados superaron los límites establecidos por la Resolución 0631 de 2015, particularmente para DBO_5 y en algunas réplicas también para DQO, lo que indica que este tratamiento no logró alcanzar completamente el cumplimiento normativo durante la temporada de lluvias.

Por su parte, el tratamiento T3, constituido únicamente por carbón activado de cáscara de coco, presentó una reducción considerable en parámetros como alcalinidad y dureza, confirmando la capacidad adsorbente del material frente a compuestos disueltos y materia orgánica. Sin embargo, este tratamiento registró los valores más altos de turbidez entre los sistemas filtrantes evaluados, posiblemente debido a la ausencia de medios de prefiltración física que permitieran la retención eficiente de sedimentos y partículas suspendidas (Pérez, 2020). De acuerdo con la American Water Works Association (AWWA, 2012), los sistemas basados exclusivamente en adsorción pueden

presentar limitaciones en la remoción de sólidos suspendidos cuando el agua presenta altas cargas de material particulado.

La conductividad en T3 presentó valores entre 700 y 760 $\mu\text{S}/\text{cm}$, evidenciando una reducción moderada de sales y compuestos disueltos respecto al agua residual sin tratar. Así mismo, los valores de DBO_5 (66–74 $\text{mg}/\text{L O}_2$) y DQO (118–132 $\text{mg}/\text{L O}_2$) demostraron una disminución importante de materia orgánica y compuestos oxidables. Aunque la DQO cumplió con los límites permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015, los valores de DBO_5 continuaron superando el límite máximo permitido de 50 $\text{mg}/\text{L O}_2$, indicando que el sistema no logró remover completamente la carga orgánica biodegradable presente en el efluente agrícola durante la temporada lluviosa.

Este comportamiento coincide con lo expuesto por Reyes (2020), quien encontró que los materiales derivados del coco presentan una alta capacidad para remover contaminantes asociados a la materia orgánica y sólidos suspendidos en sistemas de biofiltración, aunque su eficiencia aumenta cuando se combinan con otros medios filtrantes complementarios. De igual manera, Pérez (2020) destacó que la incorporación de diferentes materiales adsorbentes y filtrantes favorece una mayor reducción de sólidos suspendidos, aceites y otros contaminantes presentes en aguas residuales, especialmente en sistemas multicapa.

Así mismo, se observó una baja variabilidad entre las réplicas de cada tratamiento, lo cual indica estabilidad operativa y consistencia en el comportamiento de los sistemas de filtración durante el proceso experimental. Los resultados también permiten evidenciar que, aunque la temporada de lluvias incrementa la carga contaminante del agua residual

agrícola debido al arrastre de sedimentos y materia orgánica, los filtros implementados lograron reducir significativamente los parámetros evaluados (Rondón et al., 2020).

Durante la temporada de lluvia, los tratamientos evaluados presentaron una reducción importante de los valores de DBO_5 y DQO respecto al control, evidenciando la capacidad de los sistemas filtrantes para remover materia orgánica y compuestos oxidables presentes en el agua residual agrícola. No obstante, los valores registrados fueron superiores a los obtenidos en temporada seca, situación asociada al incremento de la escorrentía superficial y al arrastre de sedimentos, residuos orgánicos y compuestos agrícolas ocasionados por las precipitaciones.

El tratamiento T1 presentó nuevamente la mayor eficiencia de remoción, debido a la acción conjunta de la grava, arena y carbón activado, materiales que favorecen procesos de filtración y adsorción. Según Torres (2024), el carbón activado posee una elevada capacidad para retener compuestos orgánicos disueltos, contribuyendo significativamente a la disminución de parámetros como DBO_5 y DQO en aguas residuales. Asimismo, Rondón et al. (2020) indican que los sistemas filtrantes multicapa incrementan la eficiencia del tratamiento al combinar procesos físicos y químicos que permiten reducir la carga contaminante presente en efluentes agrícolas, incluso bajo condiciones de alta turbidez y elevada materia orgánica como ocurre en temporadas de lluvia.

Desde la perspectiva normativa, los resultados obtenidos durante la temporada de lluvias evidencian que el incremento de la carga contaminante asociado a la escorrentía superficial afectó la capacidad de remoción de los sistemas filtrantes evaluados. Aunque

todos los tratamientos lograron reducir significativamente los valores de DBO_5 y DQO respecto al agua residual sin tratar, únicamente el tratamiento T1 presentó resultados cercanos a los límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015. Sin embargo, la mayoría de las réplicas de este tratamiento registraron valores de DBO_5 superiores a 50 mg/L O_2 , indicando que, bajo condiciones de lluvia, el sistema no alcanzó un cumplimiento normativo completo. Por su parte, los tratamientos T2 y T3 presentaron concentraciones de DBO_5 superiores al límite permitido y, en el caso de T2, algunas réplicas también superaron el valor máximo establecido para DQO, evidenciando una menor capacidad de tratamiento frente al aumento de materia orgánica y sólidos transportados por las precipitaciones.

En términos generales, los resultados demuestran que las condiciones climáticas influyen significativamente en el desempeño de los sistemas de filtración evaluados. Mientras que en la temporada seca el tratamiento T1 logró cumplir con los parámetros regulados por la Resolución 0631 de 2015, durante la temporada de lluvias el incremento de la carga orgánica y de sólidos suspendidos redujo la eficiencia global de remoción, impidiendo el cumplimiento total de la normativa para DBO_5 . A pesar de ello, el sistema conformado por grava, arena y carbón activado continuó presentando el mejor desempeño entre las alternativas evaluadas, obteniendo las mayores reducciones de turbidez, conductividad, DBO_5 y DQO. Estos resultados permiten concluir que los sistemas multicapa constituyen una alternativa eficiente para el tratamiento de aguas residuales agrícolas; sin embargo, bajo condiciones de alta precipitación podrían requerir

etapas complementarias de tratamiento o un aumento en el tiempo de retención hidráulica para garantizar el cumplimiento normativo de manera consistente.

6.3.3.3 Evaluación de la eficiencia del sistema mediante porcentaje de remoción

Con el fin de cuantificar la eficiencia del sistema de filtración, se calculó el porcentaje de remoción (%) de los parámetros fisicoquímicos evaluados, tomando como referencia los valores iniciales del agua residual agrícola en el punto de vertimiento (agua sin tratar).

Para el cálculo del porcentaje de remoción, se tomó como referencia la concentración inicial del agua residual en el punto de vertimiento, dado que esta corresponde al afluente directo del sistema de filtración y representa las condiciones reales del efluente sin dilución.

El porcentaje de remoción permite determinar la capacidad del carbón activado para reducir la concentración de contaminantes presentes en el agua, constituyendo un indicador clave en la evaluación de tecnologías de tratamiento (Metcalf y Eddy, 2014).

Para su cálculo, se utilizó la siguiente expresión:

Ecuación 1. Porcentaje de remoción

$$\%Remoción = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

C_i = concentración inicial del parámetro

C_f = concentración final del parámetro después del tratamiento

En la Tabla 17 y 18 se presentan los porcentajes de remoción obtenidos para cada tratamiento en temporada seca y temporada lluviosa.

Tabla 17. *Porcentajes de remoción obtenidos para cada tratamiento de la temporada seca*

Tratamiento	Conductividad (%)	Turbidez (%)	Alcalinidad (%)	Dureza (%)	DBO₅ (%)	DQO (%)
T1	56.3	75.7	32.9	37.8	78.7	77.3
T2	40.0	63.2	24.8	28.1	63.3	61.5
T3	48.9	54.6	31.0	35.4	70.0	69.3

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes fueron calculados a partir de los valores promedio obtenidos en las réplicas de cada tratamiento, tomando como referencia la concentración inicial del agua residual agrícola sin tratar en el punto de vertimiento.

Los resultados obtenidos durante la temporada seca evidencian que todos los tratamientos implementados lograron reducir la concentración de contaminantes presentes en el agua residual agrícola; sin embargo, la eficiencia de remoción varió de acuerdo con la configuración del sistema filtrante.

El tratamiento T1, conformado por grava, arena y carbón activado, presentó los mayores porcentajes de remoción en turbidez (75.7 %), evidenciando una mayor eficiencia en la disminución de sólidos suspendidos y compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Este comportamiento puede atribuirse a la combinación de

mecanismos de filtración física y adsorción química proporcionados por las capas filtrantes del sistema (Metcalf y Eddy, 2014). La presencia de grava y arena favoreció la retención progresiva de partículas suspendidas, mientras que el carbón activado contribuyó a la adsorción de compuestos orgánicos y sustancias responsables del color del agua (Rondón et al., 2020).

Estos resultados coinciden con lo reportado por Rondón et al. (2020), quienes demostraron que el uso de materiales derivados del coco como medio filtrante permitió reducir significativamente parámetros como turbidez y color en agua contaminada. Asimismo, Torres (2024) evidenció que el carbón activado elaborado a partir del endocarpio de coco posee una elevada capacidad adsorbente, alcanzando eficiencias de remoción cercanas al 90 % para contaminantes orgánicos, lo que respalda la eficiencia observada en los tratamientos que incorporaron carbón activado en la presente investigación.

El tratamiento T2, compuesto por grava y carbón activado, mostró porcentajes de remoción moderados, alcanzando valores de 63.2 % en turbidez, aunque el sistema logró reducir significativamente la concentración de contaminantes respecto al agua sin tratar, la ausencia de una capa de arena pudo disminuir la capacidad de retención de partículas finas y sólidos suspendidos. A pesar de ello, el carbón activado mantuvo una importante capacidad de adsorción, permitiendo reducir parte de la carga contaminante presente en el agua residual agrícola (Rondón et al., 2020).

Por su parte, el tratamiento T3, conformado únicamente por carbón activado, presentó valores importantes de remoción en alcalinidad y dureza. Sin embargo, el porcentaje de remoción de turbidez fue menor respecto a T1, posiblemente debido a la ausencia de materiales de prefiltración física, los cuales favorecen la retención de sedimentos y partículas suspendidas (AWWA, 2012). Este comportamiento demuestra que aunque el carbón activado posee una elevada capacidad adsorbente, su eficiencia aumenta cuando se combina con otros materiales filtrantes que permitan complementar los procesos de remoción física (Torres et al., 2024)

Los resultados obtenidos en T3 guardan relación con lo expuesto por Reyes (2020), quien encontró que los materiales derivados del coco presentan una importante capacidad para remover contaminantes asociados a la materia orgánica y sólidos suspendidos en sistemas de biofiltración. De igual manera, Pérez (2020) destacó que la utilización de materiales adsorbentes y sistemas multicapa mejora significativamente la remoción de sólidos suspendidos y otros contaminantes presentes en aguas residuales, evidenciando la importancia de integrar diferentes mecanismos de filtración dentro del sistema de tratamiento.

En términos generales, los resultados permiten establecer que la combinación de grava, arena y carbón activado representa la configuración más eficiente para el tratamiento del agua residual agrícola durante la temporada seca, lo que coinciden con investigaciones previas relacionadas con el uso de materiales adsorbentes naturales y sistemas filtrantes multicapa, donde se destaca que la integración de procesos físicos y

químicos favorece una mayor eficiencia en la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales (Torres, 2024; Rondón et al., 2020).

Tabla 18. *Porcentajes de remoción obtenidos para cada tratamiento de la temporada lluviosa*

Tratamiento	Conductividad (%)	Turbidez (%)	Alcalinidad (%)	Dureza (%)	DBO ₅ (%)	DQO (%)
T1	48.3	75.6	24.9	28.8	77.5	76.4
T2	30.5	66.3	15.3	20.0	63.3	61.8
T3	38.1	60.0	21.4	25.9	70.8	68.8

Fuente: Elaboración propia.

Los porcentajes fueron calculados a partir de los valores promedio obtenidos en las réplicas de cada tratamiento, tomando como referencia la concentración inicial del agua residual agrícola sin tratar durante la temporada de lluvias.

Durante la temporada de lluvias, los sistemas de filtración implementados lograron reducir considerablemente los parámetros fisicoquímicos evaluados, aunque la eficiencia de remoción estuvo influenciada por el incremento de la carga contaminante asociado al arrastre de sedimentos y materia orgánica generado por las precipitaciones.

El tratamiento T1 presentó nuevamente los mayores porcentajes de remoción, alcanzando valores de 75.6 % para turbidez, lo cual evidencia la efectividad de la combinación de grava, arena y carbón activado para la retención de sólidos suspendidos y contaminantes disueltos. Según la FAO (2013), los sistemas multicapa permiten

mejorar el desempeño del tratamiento en condiciones de alta carga contaminante, especialmente durante eventos de lluvia. La acción conjunta de los materiales filtrantes favoreció la retención progresiva de partículas de diferente tamaño y permitió incrementar el contacto del agua con el carbón activado, optimizando los procesos de adsorción (Pérez, 2020)

Estos resultados coinciden con lo reportado por Rondón et al. (2020), quienes evidenciaron que el uso de materiales derivados del coco permitió reducir significativamente parámetros como turbidez y color en aguas contaminadas. De igual manera, Torres (2024) señaló que el carbón activado obtenido a partir del endocarpio de coco posee una elevada capacidad adsorbente frente a contaminantes orgánicos, alcanzando eficiencias de remoción cercanas al 90 %, lo cual respalda la eficiencia observada en el tratamiento T1 y confirma la efectividad del carbón activado utilizado en la presente investigación.

El tratamiento T2 mostró una eficiencia intermedia, con porcentajes de remoción inferiores a los registrados en T1. La ausencia de arena dentro de la configuración filtrante posiblemente limitó la capacidad del sistema para retener partículas finas transportadas por escorrentía superficial. Sin embargo, la presencia de grava y carbón activado permitió disminuir considerablemente la concentración de contaminantes respecto al agua sin tratar, evidenciando la contribución del carbón activado en la remoción de compuestos orgánicos y color asociados al agua residual agrícola (Pérez, 2020)

En cuanto al tratamiento T3 la eficiencia en turbidez fue menor respecto a T1, confirmando que el uso exclusivo de carbón activado presenta limitaciones en la retención de sólidos suspendidos cuando el agua posee una elevada carga de sedimentos (Metcalf y Eddy, 2014). Este comportamiento demuestra la importancia de incorporar materiales de prefiltración física dentro de los sistemas de tratamiento para mejorar la retención de partículas suspendidas (Pérez, 2020)

Los resultados obtenidos en T3 guardan relación con lo expuesto por Reyes (2020), quien encontró que los materiales derivados del coco presentan una importante capacidad de remoción de contaminantes asociados a materia orgánica y sólidos suspendidos en sistemas de biofiltración. Asimismo, Pérez (2020) destacó que los sistemas filtrantes multicapa permiten mejorar significativamente la eficiencia del tratamiento de aguas residuales, debido a la integración de procesos físicos y químicos de remoción.

Finalmente, los resultados obtenidos durante ambas temporadas permiten establecer que el sistema compuesto por grava, arena y carbón activado fue el tratamiento más eficiente, logrando los mayores porcentajes de remoción y evidenciando un mejor desempeño frente a las variaciones de calidad del agua residual agrícola ocasionadas por las condiciones climáticas. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas relacionadas con el uso de carbón activado y sistemas filtrantes multicapa para el tratamiento de aguas residuales, donde se resalta la importancia de

combinar diferentes medios filtrantes para optimizar la remoción de contaminantes físicos y químicos (Torres, 2024; Rondón et al., 2020).

6.4 Análisis estadístico de los resultados

Con el propósito de validar estadísticamente los resultados obtenidos y determinar la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos evaluados, se realizó un análisis estadístico basado en herramientas de estadística descriptiva e inferencial.

Inicialmente, se emplearon medidas de tendencia central, especialmente la media aritmética, para resumir los valores obtenidos en cada uno de los tratamientos evaluados (T1, T2 y T3), así como los porcentajes de remoción alcanzados en los parámetros fisicoquímicos analizados.

Posteriormente, se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales con el fin de establecer si las diferencias observadas entre tratamientos presentaban significancia estadística, permitiendo validar la influencia de la composición de los filtros sobre la eficiencia del proceso de tratamiento.

6.4.1 Prueba de normalidad

Previo a la aplicación de pruebas paramétricas, se evaluó la distribución de los datos mediante la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, considerando un nivel de significancia de:

$$\alpha=0.05$$

Los criterios de decisión establecidos fueron los siguientes:

- Si $p > 0.05$, los datos presentan distribución normal.
- Si $p < 0.05$, los datos no presentan distribución normal.

La prueba fue aplicada de manera independiente para los datos obtenidos durante la temporada seca y la temporada de lluvias, considerando los parámetros fisicoquímicos evaluados en cada tratamiento experimental.

Tabla 19. Resultados de la prueba de normalidad temporada seca

Parámetro	Tratamiento	Estadístico W	p-valor	Interpretación
Turbidez	T1	0.95	0.62	Normal
	T2	0.96	0.68	Normal
	T3	0.97	0.74	Normal
Alcalinidad	T1	0.93	0.55	Normal
	T2	0.95	0.61	Normal
	T3	0.96	0.69	Normal
Dureza	T1	0.94	0.59	Normal
	T2	0.95	0.65	Normal

Conductividad	T3	0.97	0.72	Normal
	T1	0.94	0.58	Normal
	T2	0.95	0.64	Normal
	T3	0.96	0.70	Normal
DBO₅	T1	0.93	0.56	Normal
	T2	0.95	0.63	Normal
	T3	0.96	0.71	Normal
DQO	T1	0.94	0.60	Normal
	T2	0.95	0.66	Normal
	T3	0.97	0.73	Normal

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Resultados de la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) – Temporada de Lluvias

Parámetro	Tratamiento	Estadístico W	p-valor	Interpretación
Turbidez	T1	0.94	0.57	Normal
	T2	0.95	0.63	Normal
	T3	0.96	0.69	Normal

Alcalinidad	T1	0.94	0.58	Normal
	T2	0.95	0.62	Normal
	T3	0.96	0.70	Normal
Dureza	T1	0.95	0.61	Normal
	T2	0.96	0.66	Normal
	T3	0.97	0.73	Normal
Conductividad	T1	0.94	0.59	Normal
	T2	0.95	0.64	Normal
	T3	0.96	0.71	Normal
DBO₅	T1	0.94	0.60	Normal
	T2	0.95	0.65	Normal
	T3	0.97	0.72	Normal
DQO	T1	0.95	0.62	Normal
	T2	0.96	0.67	Normal
	T3	0.97	0.74	Normal

Nota: Los resultados obtenidos mediante la prueba de Shapiro-Wilk evidenciaron valores de p superiores a 0.05 para todos los parámetros evaluados durante la temporada de lluvias, indicando que los datos presentan una distribución normal y permitiendo la aplicación de análisis estadísticos paramétricos para comparar la eficiencia de los tratamientos filtrantes.

Los resultados obtenidos evidencian que todos los p -valores fueron superiores al nivel de significancia establecido ($p > 0.05$), tanto en temporada seca como en temporada de lluvias, indicando que los datos presentan una distribución normal. En consecuencia, se cumple el supuesto de normalidad requerido para la aplicación de pruebas paramétricas, procediendo posteriormente con el análisis de varianza (ANOVA).

6.4.2 Análisis de varianza (ANOVA)

Para los casos en los que los datos presentaron distribución normal, se aplicó un Análisis de Varianza (ANOVA de una vía), con el fin de comparar los promedios de los parámetros fisicoquímicos entre los tratamientos T1, T2 y T3.

El ANOVA permite evaluar la siguiente hipótesis:

- Hipótesis nula (H_0): No existen diferencias significativas entre los tratamientos.
- Hipótesis alternativa (H_1): Existen diferencias significativas entre al menos uno de los tratamientos.

El criterio de decisión fue:

- Si $p < 0.05$ se rechaza $H_0 \rightarrow$ hay diferencias significativas
- Si $p > 0.05$: no se rechaza H_0

En caso de encontrar diferencias significativas, se aplicó una prueba post hoc (Tukey) para identificar entre qué tratamientos se presentan dichas diferencias.

Tabla 21. Resultados de la prueba ANOVA temporada seca

Parámetro	F calculado	p- valor	Significancia	Interpretación
Turbidez	45.32	0.0001	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
Alcalinidad	21.47	0.0010	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
Dureza	25.63	0.0008	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
Conductividad	32.84	0.0004	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
DBO₅	48.15	0.0001	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
DQO	41.26	0.0002	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos

Nota: Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados para todos los

parámetros analizados ($p < 0.05$), indicando que la composición del sistema filtrante influyó significativamente en la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en el agua residual agrícola.

Tabla 22. Resultados de la prueba ANOVA – Temporada de Lluvias

Parámetro	F calculado	p- valor	Significancia	Interpretación
Turbidez	52.84	0.0001	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
Alcalinidad	18.95	0.0015	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
Dureza	22.71	0.0011	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
Conductividad	36.42	0.0003	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
DBO₅	55.63	0.0001	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos
DQO	47.28	0.0002	$p < 0.05$	Diferencias significativas entre tratamientos

Nota: Los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la temporada de lluvias evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados ($p < 0.05$) para todos los parámetros analizados. Esto indica que la composición de los

sistemas filtrantes influyó significativamente en la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en el agua residual agrícola durante condiciones de mayor carga contaminante ocasionada por las precipitaciones.

Con el propósito de determinar la existencia de diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) para los parámetros fisicoquímicos analizados durante las temporadas seca y de lluvias.

Los resultados obtenidos evidencian que, tanto en temporada seca como en temporada de lluvias, todos los parámetros presentaron valores de $p < 0.05$ indicando diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos evaluados, lo que demuestra que la composición de los sistemas filtrantes influyó significativamente sobre la eficiencia de remoción de contaminantes presentes en el agua residual agrícola (Rondón et al., 2020)

En la temporada seca, los mayores valores de F calculado se registraron para los parámetros de turbidez (45.32), evidenciando que los tratamientos generaron diferencias importantes en la remoción de sólidos suspendidos y compuestos responsables de la coloración del agua. De igual manera, los parámetros de alcalinidad y dureza presentaron diferencias significativas, aunque con menor magnitud, indicando variaciones en la capacidad de remoción de compuestos minerales disueltos. Estos resultados coinciden con lo reportado por Rondón et al. (2020), quienes evidenciaron reducciones significativas en turbidez mediante el uso de materiales derivados del coco como medio filtrante. Así mismo, Torres (2024) destacó la elevada capacidad adsorbente

del carbón activado obtenido a partir del endocarpio de coco, logrando altas eficiencias en la remoción de contaminantes orgánicos, lo cual respalda el comportamiento observado en los tratamientos que incorporaron carbón activado dentro de la presente investigación.

Por su parte, durante la temporada de lluvias se observaron valores de F calculado ligeramente superiores para turbidez, lo cual puede relacionarse con el incremento de la carga contaminante ocasionado por la escorrentía superficial y el arrastre de sedimentos generado por las precipitaciones (FAO, 2013). Este comportamiento evidencia que las diferencias entre tratamientos se hicieron más notorias bajo condiciones de mayor contaminación inicial. La mayor variabilidad observada en esta temporada confirma que la eficiencia de los sistemas filtrantes depende no solo de la configuración del medio filtrante, sino también de las condiciones ambientales y de la carga contaminante presente en el afluente (Torres et al., 2024).

Los resultados estadísticos obtenidos permiten establecer que el tratamiento T1 presentó el mejor desempeño general en ambas temporadas, especialmente en la reducción de turbidez, debido a la combinación de grava, arena y carbón activado. Según Metcalf y Eddy (2014), los sistemas multicapa presentan mayor eficiencia en procesos de filtración al integrar mecanismos físicos de retención y procesos químicos de adsorción. Estos hallazgos también guardan relación con lo expuesto por Pérez (2020), quien destacó que los sistemas filtrantes compuestos por diferentes materiales adsorbentes permiten mejorar significativamente la remoción de sólidos suspendidos y otros contaminantes presentes en aguas residuales. De igual manera, Reyes (2020)

reportó que los materiales derivados del coco presentan una elevada capacidad de remoción de contaminantes cuando son utilizados en sistemas de biofiltración, especialmente cuando se combinan con otros medios filtrantes complementarios.

Finalmente, el análisis ANOVA confirma que las variaciones observadas entre los tratamientos no ocurrieron al azar, sino que están directamente asociadas a la configuración de los sistemas de filtración implementados, validando la efectividad del carbón activado de cáscara de coco como alternativa para el tratamiento de aguas residuales agrícolas.

Los resultados estadísticos y experimentales coinciden con investigaciones previas que resaltan la importancia del uso de sistemas multicapa y materiales adsorbentes naturales para optimizar la remoción de contaminantes físicos y químicos presentes en aguas residuales.



7. CONCLUSIONES

La caracterización física, química y microbiológica del agua residual agrícola permitió identificar alteraciones significativas en la calidad del recurso hídrico asociadas al vertimiento proveniente de actividades agrícolas. Los resultados evidenciaron incrementos en parámetros como conductividad, turbidez, alcalinidad, dureza, DBO₅ y DQO en el punto de descarga, especialmente durante la temporada de lluvias debido al efecto de la escorrentía superficial y al arrastre de sedimentos, materia orgánica y residuos agrícolas. Asimismo, se determinó que los parámetros de DBO₅ y DQO superaron los límites máximos permisibles establecidos en la Resolución 0631 de 2015, evidenciando el incumplimiento normativo del vertimiento y la necesidad de implementar alternativas de tratamiento para disminuir su impacto sobre el cuerpo hídrico receptor.

El montaje piloto de los sistemas de filtración elaborados con carbón activado de cáscara de coco permitió evaluar el comportamiento de diferentes configuraciones filtrantes para el tratamiento de aguas residuales agrícolas. La implementación de los tratamientos conformados por grava, arena y carbón activado (T1), grava y carbón activado (T2), y carbón activado únicamente (T3), demostró la viabilidad técnica del uso de materiales de origen agroindustrial como medios filtrantes. Además, el aprovechamiento de la cáscara de coco como materia prima para la producción de carbón activado constituye una alternativa sostenible y de bajo costo, promoviendo la valorización de residuos agroindustriales y la aplicación de estrategias de economía circular en el tratamiento de aguas residuales.

La determinación del grado de remoción de los parámetros evaluados permitió establecer diferencias significativas entre los tratamientos implementados. El sistema T1 presentó los mayores porcentajes de remoción de turbidez, conductividad, DBO₅ y DQO durante las temporadas seca y lluviosa, debido a la combinación de procesos físicos de filtración y mecanismos de adsorción proporcionados por la grava, arena y carbón activado. Durante la temporada seca, este tratamiento logró cumplir con los límites máximos permisibles establecidos por la Resolución 0631 de 2015 para los parámetros de pH, DBO₅ y DQO. Sin embargo, durante la temporada lluviosa, aunque mantuvo la mayor eficiencia de remoción, el incremento de la carga contaminante asociado a las precipitaciones limitó el cumplimiento total de la normativa para DBO₅. Adicionalmente, el análisis estadístico confirmó diferencias significativas entre los tratamientos, demostrando que la composición del medio filtrante influye directamente en la eficiencia del proceso de depuración.

Se concluye que los filtros elaborados con carbón activado a base de cáscara de coco constituyen una alternativa eficiente para la remoción de contaminantes presentes en aguas residuales agrícolas, siendo el tratamiento compuesto por grava, arena y carbón activado el de mejor desempeño. La evaluación realizada permitió comprobar que la incorporación de materiales filtrantes complementarios incrementa significativamente la capacidad de remoción de contaminantes y favorece el cumplimiento de los criterios establecidos por la Resolución 0631 de 2015. En consecuencia, el uso de carbón activado de cáscara de coco representa una tecnología ambientalmente sostenible y

técnicamente viable para contribuir al mejoramiento de la calidad de los vertimientos agrícolas y a la protección de los recursos hídricos.



7. RECOMENDACIONES

Para futuros estudios, se recomienda evaluar la eficiencia del sistema de filtración incluyendo un mayor número de parámetros, especialmente microbiológicos y de carga orgánica como DBO_5 y DQO, con el fin de obtener una caracterización más completa del tratamiento. Así mismo, se sugiere analizar el comportamiento del sistema en condiciones continuas de operación, considerando variables como caudal, tiempo de retención hidráulica y saturación del material adsorbente.

De igual forma, sería pertinente explorar procesos de activación química del carbón activado, con el objetivo de mejorar sus propiedades adsorbentes y aumentar la eficiencia del sistema. También se recomienda realizar estudios a mayor escala (piloto o semi-industrial), que permitan validar la aplicabilidad del sistema en contextos reales.

Finalmente, se propone integrar este tipo de tecnologías con otros procesos de tratamiento (como filtración biológica o sistemas híbridos), con el fin de optimizar la remoción de contaminantes y asegurar el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.



BIBLIOGRAFIA

- Ahmad, A. A., Hameed, B. H., & Aziz, N. (2020). Adsorption of pesticides in water using activated carbon derived from agricultural waste: A review. *Journal of Environmental Management*, 260, 110097.
- Chandana, K. Krushnamurthy, D. Suryakala, & Ch. Subrahmanyam, «Low-cost adsorbent derived from the coconut shell for the removal of hexavalent chromium from aqueous medium», *Materials Today: Proceedings*, pp. 1-8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.205>, 2019.
- FAO (2017). *Wastewater: From Waste to Resource*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Recuperado de: www.fao.org
- IDEAM (2021). *Informe Nacional del Estado del Recurso Hídrico en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Madueño, M. Meza, & C. Rashta, (2020). «Tratamiento y reuso de aguas grises mediante un filtro lento de arena», *Tecnia*, vol. 28, n.o 1, pp. 81-85
- Molina, J., (2019). «Elaboración de un filtro artesanal de agua utilizando materiales no convencionales, evaluando su eficiencia para la disminución de los niveles de contaminación de aguas residuales generadas por una lavadora de autos», trabajo de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador.
- Pérez, A. (2020). «Análisis de la zeolita como medio filtrante en el tratamiento de aguas residuales provenientes de la lavadora de autos Ayuda al campesino de la Parroquia La Matriz», trabajo de Grado, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador,

- Reyes, V. (2020). «Determinación de la eficiencia del aserrín y la fibra de coco utilizados como empaques para la remoción de contaminantes en biofiltros para el tratamiento de aguas residuales», *Enfoque UTE*, vol. 7, n.o 3, pp. 41-56
- Ríos-Bernal, N., Taboada-González, P. A., & Martínez-Ruiz, E. (2019). Adsorción de nitratos y fosfatos con carbón activado de biomasa. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 18(2), 693-705.
- RONDÓN PERDOMO, ANDREA YESEBEL, CASTILLO CAMPOS, LUIS ANTONIO, & MIRANDA, JIMMY. (2020). Uso de la cáscara de coco (Cocos nucifera) como medio filtrante en el tratamiento del agua del campo El Salto, Venezuela. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(1), 125-147. Epub June 02, 2021. <https://doi.org/10.14482/inde.38.1.628.16>
- Torres, A. (2024). ELABORACIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DEL ENDOCARPIO DEL COCO. En línea: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/28798/1/UPS-GT005616.pdf>
- Yachas Tena, «Grado de eficacia del carbón activado de la cáscara de coco, en la absorción del hierro y plomo del agua de consumos de los estudiantes de la I.E. San Andrés de Paragsha-Simón Bolívar 2018», trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Cerro de Pasco, Perú, 2019.

ANEXOS

Anexo 1. Toma de muestras de agua



Anexo 2. Caracterización inicial









Anexo 3. Sistema filtrante realizado



Anexo 4. Caracterización final



