

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS VILLAVICENCIO
DOCUMENTO DE TRABAJO - PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
CONVOCATORIA INTERNA MISIONES EN CIENCIA 2026 - 2027
MODALIDAD: Proyectos FODEIN

**TRATAMIENTO DE EFLUENTES REALES MEDIANTE LA SINERGIA
ENTRE PROCESO ELECTROQUIMICO Y SOLUCIÓN BASADA EN LA
NATURALEZA: EFICIENCIA Y PERFIL ECOTOXICOLÓGICO**

INVESTIGADOR PRINCIPAL.

Edgar Fajardo Puerto

Ingeniero Químico, Magíster en Ingeniería de Procesos y Sistemas Industriales, Magíster en Técnicas y Ciencias de la Calidad del Agua, Doctor en Química.

CC: 1.018.473.157, CvLAC:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0000159757

CO-INVESTIGADOR.

Cindy Johanna Niño Camacho

Bióloga, Magíster en Ciencias Biológicas

CC: 1.053.585.775, CvLAC:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001605655

CO-INVESTIGADOR.

Jonatan Fernando Castellano Hernandez

Ingeniero Mecatrónico, Magíster en Dirección y Gestión de Proyectos

CC: 1.098.672.897, CvLAC:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001902715

CO-INVESTIGADOR.

Raquel Beatriz Romero Puentes

Ingeniera Ambiental, Magíster en Ingeniería Ambiental y Doctora en Ingeniería

CC: 1.022.326.229, CvLAC:

https://scienti.minciencias.gov.co/cvlac/visualizador/generarCurriculoCv.do?cod_rh=0001165879

AUXILIARES DE INVESTIGACIÓN

Angie Paola Gasca Rodríguez, Santiago Andres Torres Rodriguez, Laura Sofia Fajardo Correa, Danna Victoria Fonseca Trujillo, Julieth Alejandra Jiménez Mendez

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL - GRUPO DE INVESTIGACIÓN GESTIÓN AMBIENTAL USTA VILLAVICENCIO (GAUV); GrupLAC:

<https://scienti.colciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000016177>

Cohesión con: FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRONICA - GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA Y MECATRÓNICA - (GIMEC); GrupLAC:

<https://scienti.minciencias.gov.co/gruplac/jsp/visualiza/visualizagr.jsp?nro=00000000021023>

RESUMEN

Con la creciente presión hídrica a nivel mundial, la contaminación del agua es uno de las problemáticas a enfrentar, sin embargo, la situación toma mayor relevancia cuando se ha demostrado que los métodos tradicionales de tratamiento (depuración) resultan ineficientes en ciertos tipos de aguas dependiendo el contaminante a tratar (contaminantes emergentes o de interés emergente); sumado a esto considerando las nuevas tendencias de química verde y economía circular, se hace necesario la búsqueda de nuevos procesos capaces de degradar la materia orgánica contaminante de diferentes tipos de agua. En consideración con lo ya mencionado, el presente proyecto tiene como objetivo evaluar el tratamiento de un agua real de origen subterráneo mediante el acople de dos tecnologías enfocadas en la degradación de contaminantes recalcitrantes y la economía verde, como lo son la electrocoagulación asistida y la adsorción con carbón activado.

El proyecto al enfocarse en el tratamiento de un agua real se enfocará en la primera fase en seleccionar adecuadamente el tipo de contaminante a evaluar, lo cual dependerá de la caracterización inicial del efluente. Posterior a esto, se evaluarán los rendimientos de remoción y/o degradación de cada proceso por separado a fin de verificar su contribución con el rendimiento global. Parte de la novedad del proyecto se basa en la síntesis de carbón activado mediante atmosfera reductora autogenerada, la cual según lo reportado en la literatura no ha sido evaluada en la región, lo que resulta interesante para el escalamiento adecuado del proceso a niveles más industriales o comerciales, al superar barreras no solo técnicas (uso de mufla y no de horno tubular), sino además económicas al evitar el uso de atmosferas inertes externas (nitrógeno, argón o demás). Del mismo modo, los estudios basados en electrocoagulación asistida han sido poco reportados, por lo que resulta atractivo y novedoso la evaluación del carbón activado como coadyuvante en la remoción de contaminantes mediante el proceso electroquímico. Finalmente, como parte del estudio y parte innovadora, se plantea hacer seguimiento a la cinética del proceso (en condiciones óptimas) mediante pruebas microbiológicas con lo cual pretendemos en la etapa final del proceso lograr evaluar el potencial eco toxicológico del agua e indirectamente del tratamiento evaluado.

PALABRAS CLAVE: Carbón activado, Electrocoagulación, Contaminantes emergentes.

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La gestión adecuada del recurso hídrico en regiones en vía de desarrollo presenta retos no solo medioambientales, sino también de carácter científico y socioeconómico; el tratamiento eficiente de efluentes reales con mezclas complejas necesita ser abordado de tal manera que se dé respuesta a los 3 ejes mencionados previamente. A nivel global y local, la presencia de compuestos recalcitrantes (tales como surfactantes) en cuerpos de agua subterráneos y superficiales ha despertado interés general y prioritario debido a su complejidad a nivel eco toxicológico y de biodegradabilidad para los ecosistemas acuáticos, lo cual puede alterar el equilibrio ambiental (Farahmand *et al.*, 2026; Shreya *et al.*, 2021). Esta problemática toma mayor relevancia al evidenciar los reportes en la literatura sobre la ineficiencia de las tecnologías de tratamiento convencionales (físicas, químicas y biológicas) sobre este tipo de contaminantes de interés emergente (surfactantes recalcitrantes), asociado principalmente a los elevados costos y poca o nula mineralización de los contaminantes en cuestión (Sharma *et al.*, 2023; Teklemedhin *et al.*, 2025).

Si bien es cierto que la electrocoagulación (EC) ha sido consolidada como una tecnología electroquímica robusta, con capacidad de desestabilizar contaminantes y removerlos sin necesidad de reactivos externos (Gönder *et al.*, 2017), su aplicación directa en matrices complejas o aguas altamente contaminadas presenta algunas limitaciones a superar. La EC es una tecnología que de manera individual presenta mineralización total de materia orgánica persistente (recalcitrante), sin embargo, una de sus principales limitantes es la pasivación de los electrodos (Al-Qodah *et al.*, 2020; Gönder *et al.*, 2017). De manera similar, aunque la adsorción de contaminantes (contaminantes traza y surfactantes) con carbón activado (CA) ha sido ampliamente estudiado y mostrado resultados prometedores (Sanchez-Cano *et al.*, 2025), el principal inconveniente radica en el alto costo de producción y regeneración del CA comercial, dificultando su aplicación a gran escala (Dalmaz & Sivrikaya, 2024; Sharma *et al.*, 2023).

El presente proyecto plantea una estrategia tecnológica a fin de superar las limitaciones de cada tecnología, mediante la integración y sinergia de la electrocoagulación asistida con carbón activado sintetizado a partir de biomasa (enfocándonos en la economía circular de la región). La literatura reporta que los sistemas combinados de electrocoagulación adsorción (CEA) no solo genera un efecto sinérgico al aumentar la tasa de remoción de contaminantes, sino que además logra mejores eficiencias de hasta un 20% superior en comparación con la EC individual. (Al-Qodah *et al.*, 2020).

El monitoreo analítico del contaminante a remover es un paso crucial en la metodología de cualquier estudio o tecnología de tratamiento de agua; en efluentes reales hacer seguimiento a surfactantes resulta en un desafío técnico considerable al requerir el uso de solventes como el cloroformo (necesario atacar esto basado en principios de química verde). A fin de hacer frente a esta limitante y garantizar un seguimiento cinético adecuado, en el presente proyecto se propone el uso de azul de metileno (AM) en mezcla directamente con el efluente

real; esto principalmente atribuido a que el AM es un colorante ampliamente validado en la literatura como molécula modelo para evaluar procesos de adsorción y formar complejos con surfactantes aniónicos, lo que permite seguir la reacción de manera eficaz y reproducible mediante la absorbancia directamente (Dalmaz & Sivrikaya, 2024; Ncibi & Sillanpää, 2015).

En consideración con todo lo mencionado previamente, la pertinencia del proyecto radica principalmente en cubrir un vacío crítico en la síntesis de carbón activado con atmosfera autogenerada en la región, la evaluación de la EC asistida con AC en el tratamiento de aguas reales, así como la seguridad biológica del efluente. Es bien sabido, que la simple reducción de la absorbancia o concentración del contaminante objetivo no garantiza directamente la inocuidad del agua tratada, ya que durante el proceso se obtienen mineralizaciones parciales que pueden dar como resultado subproductos intermedios con un potencial de toxicidad superior a la molécula inicial (Farahmand et al., 2026; Kumar *et al.*, 2023). Por tanto, una vez se establezcan condiciones óptimas de operación (mediante la evaluación de cada tratamiento individual, EC y adsorción con CA y en conjunto EC-CA), se hace necesario realizar el seguimiento cinético del efluente empleando bioensayos con microorganismos mesófilos, lo cual permitirá validar la sinergia tecnológica del tratamiento no solo removiendo el contaminante, sino que eliminando el riesgo biológico para el entorno.

De esta manera, la pregunta de investigación a resolver es ¿Cómo influye la sinergia entre el proceso de electrocoagulación y adsorción con carbón activado (sintetizado a partir de biomasa local) en la eficiencia de degradación de contaminantes emergentes/de interés emergente), evaluando cinéticamente a través de sustancias reactivas al azul de metileno por absorbancia y en la toxicidad del efluente real?

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la eficiencia de la sinergia entre un tratamiento avanzado y una solución basada en la naturaleza, para la remoción de materia orgánica y contaminante estudio (dependiendo de la caracterización inicial del agua) evaluando la toxicidad relativa del efluente final.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Optimizar la etapa de electrocoagulación, evaluando el efecto de diferentes materiales de electrodo y parámetros operacionales sobre la carga contaminante inicial.
- Evaluar la eficiencia de la electrocoagulación en la remoción de carga orgánica y contaminantes, analizando la influencia del sustrato, empleando materiales carbonosos como coadyuvantes.
- Determinar la calidad del agua tratada mediante el sistema híbrido con análisis de remoción de contaminante estudio y ensayo de toxicidad, determinando la eficiencia global del proceso y comportamiento del riesgo ambiental del efluente.

JUSTIFICACIÓN

La creciente presión sobre el recurso hídrico a nivel mundial exige el desarrollo de alternativas de depuración eficientes, económicas y sostenibles. Entre los contaminantes más desafiantes y reportados con frecuencia en aguas reales se encuentran los surfactantes, los cuales por su naturaleza resultan ser compuestos recalcitrantes que alteran la tensión superficial del agua y generan toxicidad que altera considerablemente a los ecosistemas acuáticos (Shreya *et al.*, 2021). Frente a esta situación, las tecnologías tradicionales de tratamiento (o depuración) resultan ineficientes debido a la alta variabilidad y complejidad de las matrices a tratar (Rajamanivannan *et al.*, 2025), lo que resulta en costos operativos elevados y con mineralizaciones parciales de los contaminantes o en efluente de mayor toxicidad postratamiento.

El presente proyecto tiene por tanto como justificación tres pilares fundamentales; el primero hace referencia a la innovación tecnológica que supera los limitantes de los tratamientos individuales. Si bien la EC es amigable con el medio ambiente, la pasivación de los electrodos sigue generando problemas en cuanto a costos y operación per se del sistema, por lo que el acople con CA genera un sistema híbrido con efecto sinérgico que se espera acelere la remoción de contaminante y como se ha reportado mejore la eficiencia global en hasta un 20% más que el proceso individual (Al-Qodah *et al.*, 2020). Por su parte la síntesis propuesta de CA, está pensada para garantizar la viabilidad económica y fomentar la economía circular en la región al emplear como insumo biomasa residual local empleando una mufla con atmosfera limitante de oxígeno autogenerada, eliminando la costosa dependencia de gases inertes y hornos tubulares (Sharma *et al.*, 2023).

El segundo pilar del proyecto se enfoca en la pertinencia metodológica al acatar un principio de química verde (principio 5) evitando el uso de solventes orgánicos como el cloroformo (empleado para extracciones en el proceso estándar de determinación de surfactantes). Para ello, el seguimiento cinético de la degradación de los surfactantes aniónicos se realizará haciendo seguimiento al azul de metileno como molécula modelo (con capacidad de interactuar con los surfactantes) (Faggiano *et al.*, 2025). El azul de metileno interactúa mediante fuerzas electrostáticas formando complejos estables con los surfactantes, los cuales pueden medirse directamente mediante espectrofotometría uv-vis (Dalmaz & Sivrikaya, 2024; Ncibi & Sillanpää, 2015), ofreciendo un método, reproducible y de menor impacto ambiental.

El pilar con mayor impacto técnico ambiental para la investigación radica en la evaluación de la seguridad biológica del efluente. De acuerdo con la literatura reciente, es sabido que los procesos de oxidación y electroquímicos aplicados a efluentes contaminados con surfactantes, pueden dar paso a la generación de subproductos intermedios de degradación con potencial toxicidad mayor al de la molécula inicial (Farahmand *et al.*, 2026). Por tanto, optimizar los parámetros operativos de cada proceso y su posterior acople buscando la sinergia entre ambos, se relaciona directamente con la evaluación eco toxicológica final mediante bioensayos con microorganismos mesófilos; lo cual asegurara que el sistema propuesto no solo cumpla con la remoción del contaminante, sino que se cuente con un efluente más inocuo respecto al influente, dando como resultado una solución integral a la región para la protección del recurso hídrico.

MARCO TEÓRICO

- **Naturaleza de los surfactantes e interacciones con azul de metileno**

Los surfactantes, debido a su naturaleza anfifílica (segmentos hidrofóbicos e hidrofílicos), suelen acumularse en las zonas interfaciales del agua, lo que genera alteraciones críticas en los ecosistemas, haciendo necesario el uso de técnicas avanzadas para su control (Bautista-Toledo *et al.*, 2014). En matrices complejas como lo son algunos efluentes reales, los surfactantes facilitan la agregación micelar y deposición coloidal (Atesci & Inan, 2026). Desde una perspectiva analítica y fisicoquímica, se ha estandarizado el protocolo de medición de los surfactantes basado en su interacción electrostática con colorantes catiónicos como el azul de metileno, la cual posibilita seguir la concentración del contaminante mediante espectrofotometría uv-vis (Shittu *et al.*, 2019).

- **Fundamentos y limitaciones de la electrocoagulación (EC)**

La EC es un tratamiento avanzado basado en la disolución anódica de electrodos de sacrificio (tradicionalmente hierro o aluminio), liberando cationes (M^{3+} ; donde M es algún metal Fe, Al) que se hidrolizan para formar diversas especies monoméricas y poliméricas (polihidróxidos metálicos), resultando en la formación de flóculos amorfos ($M(OH)_3$) (Shakeri *et al.*, 2021). Estos flóculos generados in situ tienen la capacidad de remover contaminantes del agua mediante diferentes mecanismos, adsorción, neutralización de cargas y coagulación de barrido (sweep coagulation) (Barişçi & Turkay, 2016).

- **Adsorción con carbón activado derivado de biomasa**

A fin de mitigar las limitaciones de la EC, se ha propuesto el uso de carbón activado a partir de residuos agroindustriales; este tipo de carbones representan una solución sostenible gracias a su gran área superficial y versatilidad (por adsorción de contaminantes) brindada por sus abundantes grupos funcionales en superficie (Benmahdi *et al.*, 2026). La activación química de biomasa ha sido ampliamente estudiada puesto que genera una extensa red de microporos y mesoporos mediante la deshidratación y aromatización de la estructura de carbono, lo cual optimiza la capacidad de adsorción del material resultante (Gholami *et al.*, 2026). Los estudios de adsorción de contaminantes en este tipo de materiales son modelados principalmente mediante cinéticas de pseudo-segundo orden, confirmando que el proceso está gobernado por la quimisorción (intercambio o compartición de electrones) (Benmahdi *et al.*, 2026; Gholami *et al.*, 2026). En el punto de equilibrio, la cinética tiende ajustarse al modelo de Langmuir, lo que se asocia con la adsorción en monocapa fuertemente impulsada por puentes de hidrógeno, interacciones π - π (Jaber *et al.*, 2024).

- **Sinergia en procesos integrados (EC-CA)**

El acople de la EC con CA genera un efecto sinérgico de alta eficiencia; durante la electrolisis, los cationes altamente cargados desestabilizan las partículas coloidales presentes en la matriz acuosa, generando sitios adicionales para la adsorción (Ika Pratiwi *et al.*, 2021). En este nuevo medio de reacción, los surfactantes son adsorbidos inicialmente sobre la superficie de los polihidróxidos metálicos formando una superficie hidrofóbica, lo que fuerza al complejo formado a unirse a las microburbujas de hidrógeno y oxígeno generados en el cátodo dando paso a la electroflotación, haciendo que la separación de fases sea considerablemente más rápida junto al carbón activado, comparado a si estuviese sin el CA (Ge *et al.*, 2004).

- **Remoción del contaminante y perfil eco toxicológico**

La evaluación de las tecnologías de remoción no debe limitarse únicamente a medir la reducción de concentración del contaminante, debido a que los procesos electroquímicos tienen rutas de degradación molecular que genera productos intermediarios (Zhao *et al.*, 2024). Por otra parte, se ha evidenciado que, durante la adsorción en el carbón activado, se genera una retención de microorganismos capaces de degradar fracciones biodegradables de contaminantes, lo cual mejora aún más la eficiencia de remoción (Bautista-Toledo *et al.*, 2014). Considerando lo mencionado anteriormente, se justifica plenamente la necesidad de integrar los bioensayos con mesófilos a fin de monitorear el perfil eco toxicológico del agua y verificar que los intermedios de degradación no eleven la toxicidad del efluente final tratado.

MARCO METODOLÓGICO

- **Recolección y acondicionamiento de efluente a tratar**

El estudio se llevará a cabo empleando agua real de origen subterráneo proveniente de la región. Previo a la experimentación a llevar a cabo durante todo el proyecto, se realizará una caracterización fisicoquímica inicial (por parte de un tercero) para establecer los parámetros iniciales o pretratamiento.

- **Síntesis de carbón activado**

El CA será sintetizado a partir de biomasa residual local (cascarilla de arroz) a fin de promover la economía circular. Previo el proceso de carbonización, la biomasa será secada y tamizada para obtener un tamaño de partícula uniforme (Sivasubramanian *et al.*, 2025). Posteriormente, el material se someterá a impregnación con KOH concentrado (mínimo de agua para solubilizar) en relación másica 1:1 para su posterior activación en mufla. La innovación técnica a nivel local radicara en el uso de la mufla convencional para trabajar a temperaturas entre 500 y 600°C en ausencia de nitrógeno. Con este proceso, se obtendrá una activación térmica y química simultánea bajo atmósfera limitante de oxígeno autogenerada en un recipiente cerrado (con arena sílice) (Ahmed *et al.*, 2023), con lo que se supera una limitante técnica y económica como es el uso de hornos tubulares con flujo continuo de gases inertes (como nitrógeno o argón). En última etapa, el CA será sometido a lavado para eliminar cualquier impureza remanente en la muestra y de igual manera ajustar el pH hasta la neutralidad, para su posterior secado y uso en los ensayos de adsorción.

- **Configuración del sistema de electrocoagulación**

El proceso de EC será llevado a cabo en un reactor tipo batch; el sistema contará con electrodos metálicos de placa plana (de hierro y/o aluminio, según configuración) dispuestos en paralelo y conectados a una fuente de poder de corriente continua. Durante los ensayos de EC, se evaluará la configuración de electrodos (tipo de metal para cátodo y ánodo y cantidad) a fin de optimizar el proceso.

- **Acople EC-CA y seguimiento cinético**

Para evaluar la remoción de los surfactantes de manera más simplificada e intentando hacer frente a los principios de química verde, la cinética se llevará a cabo haciéndole seguimiento a la absorbancia del agua directamente al ser mezclada con azul de metileno como referencia (Alamin *et al.*, 2021). La concentración residual del complejo formado se cuantificará mediante espectrofotometría uv-vis leyendo la absorbancia a valores entre 600 y 700 nm.

Para el análisis de los datos, los resultados serán ajustados a modelos de cinética de pseudo primer y segundo orden, lo que permitirá determinar las tasas de reacción.

- **Evaluación ecotoxicológica**

Una vez definidas las condiciones óptimas de operación (máxima reducción de absorbancia), se procederá a evaluar de manera cinética la inocuidad biológica del efluente tratado. Dado que los productos intermedios de reacción pueden presentar una mayor toxicidad que los compuestos iniciales, se realizarán bioensayos de viabilidad mediante el seguimiento de cultivos puros de microorganismos mesófilos.

En particular, se incluirá el monitoreo de microorganismos indicadores y potencialmente patógenos asociados a la calidad del agua, como mesófilos, *Escherichia coli*, *Enterobacter* spp., evaluando su capacidad de supervivencia y proliferación en el efluente tratado. Estos ensayos se llevarán a cabo a diferentes dosis del tratamiento, con el fin de analizar la relación dosis-respuesta y determinar la eficiencia en la remoción de toxicidad.

El efluente será sometido a estándares biológicos que permitan verificar que las bacterias indicadoras puedan sobrevivir y desarrollarse de manera controlada, sin evidencias de efectos inhibitorios o tóxicos. Los resultados obtenidos constituirán un criterio definitivo para establecer si el proceso acoplado logra reducir o eliminar de manera efectiva el riesgo ambiental asociado al influente.

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En la Tabla 1 que aparece a continuación, se presenta el cronograma de actividades (4) del proyecto, en un periodo de 11 meses, de los cuales los primeros 5 serán de puesta en marcha y preparación de equipos, los siguientes 6 meses corresponderán a la obtención de resultados (caracterización total de efluentes de cada proceso optimizado) y preparación de productos e informe final.

Tabla 1. Cronograma de actividades por actividades del proyecto

[illegible]

	Mes 9			
Escritura de informe parcial 2 y sistematización de entregables	S33	S34	S35	S36
ACTIVIDAD 3.				
Tarea 3.1 Caracterización del efluente final				
Tarea 3.2 Analisis y procesamiento de resultados				
Tarea 2.3 Socialización de resultados con comunidad academica				

	Mes 10				Mes 11			
Escritura de informe parcial 2 y sistematización de entregables	S37	S38	S39	S40	S41	S42	S43	S44
ACTIVIDAD 4.								
Tarea 4.1 Redacción de manuscrito								
Tarea 4.2 Entrega de equipos								

PRESUPUESTO

Tabla 2. Descripción de rubros y costo de cada actividad para la ejecución del proyecto

ACTIVIDAD POR DESARROLLAR	MESES	PLAN DE GASTOS	VALOR SOLICITADO
Actividad 1 y 2	1 a 8	Servicios técnicos: Caracterización del influente a tratar y materiales de investigación. Materiales e insumos: Compra de materiales y reactivos necesarios para la puesta en marcha del proyecto (EC y síntesis de CA)	\$7'200.000 COP
Actividad 3 y 4	9 a 11	Servicios técnicos: Caracterización de efluentes. Materiales e insumos: Compra de materiales e insumos necesarios para el procesamiento de resultados y obtención de productos.	\$4'800.000 COP
TOTAL, A FINANCIAR			\$12'000.000 COP

PRODUCCIÓN PROGRAMADA E IMPACTO ESPERADO

Tabla 3. Descripción de productos a obtener del proyecto

CATEGORÍA COLCIENCIAS	PRODUCTO ESPERADO	DESCRIPCIÓN
Producción bibliográfica	Artículo de investigación	1 artículo de investigación
Productos de investigación + Creación	Taller de creación	1 taller sobre el tratamiento de aguas residuales mediante diferentes tecnologías, con estudiantes de instituciones de educación superior
Producción técnica y tecnológica	Concepto técnico	Concepto técnico sobre síntesis de carbón activado y tren de tratamiento para el agua a tratar.

Bibliografía

- Ahmed, T. A., Abdulhameed, A. S., Ibrahim, S., ALothman, Z. A., Wilson, L. D., & Jawad, A. H. (2023). High surface area mesoporous activated carbon produced from Iraqi reed via pyrolysis assisted H₃PO₄ activation: Box-Behnken design for surfactant removal. *Diamond and Related Materials*, 133, 109756. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.109756>
- Alamin, N. U., Khan, A. S., Nasrullah, A., Iqbal, J., Ullah, Z., Din, I. U., Muhammad, N., & Khan, S. Z. (2021). Activated carbon-alginate beads impregnated with surfactant as sustainable adsorbent for efficient removal of methylene blue. *International Journal of Biological Macromolecules*, 176, 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.02.017>
- Al-Qodah, Z., Tawalbeh, M., Al-Shannag, M., Al-Anber, Z., & Bani-Melhem, K. (2020). Combined electrocoagulation processes as a novel approach for enhanced pollutants removal: A state-of-the-art review. *Science of the Total Environment*, 744, 140806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140806>
- Atesci, Z. C., & Inan, H. (2026). Filtration-based reduction of surfactants and fiber-derived micro/nanoplastics from domestic laundry wastewater. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 77, 102366. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2026.102366>
- Barişçi, S., & Turkay, O. (2016). Domestic greywater treatment by electrocoagulation using hybrid electrode combinations. *Journal of Water Process Engineering*, 10, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.01.015>

- Bautista-Toledo, M. I., Rivera-Utrilla, J., Méndez-Díaz, J. D., Sánchez-Polo, M., & Carrasco-Marín, F. (2014). Removal of the surfactant sodium dodecylbenzenesulfonate from water by processes based on adsorption/bioadsorption and biodegradation. *Journal of Colloid and Interface Science*, 418, 113–119. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.12.001>
- Benmahdi, F., Khelali, A., Kolli, M., & Khettaf, S. (2026). Sustainable dye removal via Punica granatum waste-derived activated carbon: CCD-RSM optimization and adsorption insights. *Next Materials*, 10, 101395. <https://doi.org/10.1016/j.nxmte.2025.101395>
- Dalmaz, A., & Sivrikaya, S. (2024). Methylene blue dye efficient removal using activated carbon developed from waste cigarette butts: Adsorption, thermodynamic and kinetics. *Fuel*, 372, 132151. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132151>
- Faggiano, A., Ricciardi, M., Motta, O., Fiorentino, A., & Proto, A. (2025). Comparative study of greywater treatment using activated carbon and woodchip biochar for surfactant and organic matter removal. *Separation and Purification Technology*, 356 (A), 129861. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.129861>
- Farahmand, G., Isgoren, M., Sezer, M., & Veli, S. (2026). Enhanced detergent removal from hospital laundry wastewater using air-assisted electrocoagulation and peroxi-coagulation: Process optimization via Box-Behnken Design and a comparative approach. *Process Safety and Environmental Protection*, 207, 108423. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2026.108423>
- Ge, J., Qu, J., Lei, P., & Liu, H. (2004). New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*, 36(1), 33–39. [https://doi.org/10.1016/S1383-5866\(03\)00150-3](https://doi.org/10.1016/S1383-5866(03)00150-3)
- Gholami, M., O'Sullivan, A. D., & Mackey, H. R. (2026). Greywater treatment using porous activated apricot stone waste for application in nature-based systems. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 14(1), 120664. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.120664>
- Gönder, Z. B., Balcıoğlu, G., Vergili, I., & Kaya, Y. (2017). Electrochemical treatment of carwash wastewater using Fe and Al electrode: Techno-economic analysis and sludge characterization. *Journal of Environmental Management*, 200, 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.005>
- Ika Pratiwi, N., Mukimin, A., Zen, N., & Septarina, I. (2021). Integration of electrocoagulation, adsorption and wetland technology for jewelry industry wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 279, 119690. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119690>
- Jaber, L., Backer, S. N., Laoui, T., Abumadi, F., Koujan, M. M. S., Khalil, K. A., Shanableh, A., & Atieh, M. A. (2024). Recent trends in surface impregnation techniques on activated carbon for efficient pollutant removal from wastewater. In *Desalination and Water Treatment*, 319, 100562.

<https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100562>

- Kumar, N., Pandey, A., Rosy, & Sharma, Y. C. (2023). A review on sustainable mesoporous activated carbon as adsorbent for efficient removal of hazardous dyes from industrial wastewater. In *Journal of Water Process Engineering*, 54, 104054. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104054>
- Ncibi, M. C., & Sillanpää, M. (2015). Mesoporous carbonaceous materials for single and simultaneous removal of organic pollutants: Activated carbons vs. carbon nanotubes. *Journal of Molecular Liquids*, 207, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.03.050>
- Rajamanivannan, H. B., Umapathy, S., Solaiappan, V., & Swaminathan, S. (2025). Compact point-of-use treatment and repurposing of domestic laundry greywater through electrocoagulation with finned electrodes. *Process Safety and Environmental Protection*, 201 (A), 107549. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2025.107549>
- Sanchez-Cano, G., Amado, M., Arozamena, E., Saez, L., Lastra, A., Rojas, S., & Horcajada, P. (2025). Pilot-scale assessment of modified activated carbon for minimizing disinfection by-products in freshwater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(6), 119506. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.119506>
- Shakeri, E., Mousazadeh, M., Ahmadpari, H., Kabdaşlı, I., Jamali, H. A., Graça, N. S., & Emamjomeh, M. M. (2021). Electrocoagulation-flotation treatment followed by sedimentation of carpet cleaning wastewater: Optimization of key operating parameters via RSM-CCD. *Desalination and Water Treatment*, 227, 163–176. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27307>
- Sharma, S., Ezung, S. L., Supong, A., Baruah, M., Kumar, S., Umdor, R. S., & Sinha, D. (2023). Activated carbon adsorbent derived from waste biomass, “Croton caudatus” for efficient removal of 2-chlorophenol from aqueous solution: Kinetics, isotherm, thermodynamics and DFT simulation. *Chemical Engineering Research and Design*, 190, 777–792. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.01.002>
- Shittu, I., Achazhiyath Edathil, A., Alsaedi, A., Al-Asheh, S., Polychronopoulou, K., & Banat, F. (2019). Development of novel surfactant functionalized porous graphitic carbon as an efficient adsorbent for the removal of methylene blue dye from aqueous solutions. *Journal of Water Process Engineering*, 28, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.01.001>
- Shreya, Verma, A. K., Dash, A. K., Bhunia, P., & Dash, R. R. (2021). Removal of surfactants in greywater using low-cost natural adsorbents: A review. In *Surfaces and Interfaces*, 27, 101532. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101532>
- Sivasubramanian, P. D., Kumar, M., Chen, C. L., Senthilkumar, A. K., & Chang, J. H. (2025). Potential of NaOH-activated LDH/surfactant-modified biochar for nitrate adsorption: exploring mechanisms and CO₂ adsorption for sustainability development. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2025.106330>
- Teklemedhin, T. B., Wan, Z., Hossain, N., Guo, Y., & Li, H. (2025). Bio-

adsorbents derived from carbohydrates, lignin, and protein biomass as potential environmental remediation: A comprehensive review. In *International Journal of Biological Macromolecules*, 320(2), 145861. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.145861>

Zhao, X., Huang, Z., Sun, H., Zhao, Q., Huang, Z., Zhang, C., Wang, Y., Yang, C., & Zhou, Z. (2024). Comparison on molecular transformation of dissolved organic matter during Fenton and activated carbon adsorption processes for chemical cleaning wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 344, 127226. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127226>