



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad de Ingeniería

AVANCES Y TENDENCIAS en Ingeniería

Vol. 2025: Dossier de Investigación de Maestría y Doctorado

Rector de la Universidad de Antioquia

Luquegi Gil Neira

Decano de la Facultad de Ingeniería

Elkin Libardo Ríos Ortiz

Vicedecano de la Facultad de Ingeniería

Ricardo Emilio Aristizábal Sierra

Coordinador Posgrados

Juan Guillermo Villegas Ramírez

Jefe del Departamento de Recursos de Apoyo e Informática (DRAI)

John Mario Rendón Uribe

Coordinador de Producción

Rubén Dario Echavarria Cifuentes

Asesora pedagógica

Laura Isabel Builes Caicedo

Diagramación y Diseño

Sara Isabel Del Portillo Ramírez

Comité Editorial

Natalia Gaviria Gómez

Profesora Departamento de Ingeniería Electrónica

Isabel Cristina Álvarez Maya
Asistente Unidad de posgrado

Luis Carlos Oliveros Torres
Auxiliar SEA Unidad de posgrado

Maryory Astrid Gómez Botero
Directora Revista REDIN

Sandra L. Hernández
BarrientosAsistente Revista REDIN

Seleny Zapata Soto
Coordinadora Centro de Documentación

Juan Guillermo Villegas Ramírez
Profesor Departamento de Ingeniería Industrial

Comité Organizador

Natalia Gaviria Gómez
Coordinadora de Posgrados

Isabel Cristina Álvarez Maya
Asistente Unidad de posgrado

Lina Patricia Mazo Garro
Auxiliar Administrativa Unidad de posgrado

Comité Científico

Natalia Gaviria Gómez
Coordinadora de Posgrados

Julio Eduardo Cañón Barriga
Coordinador de Maestrías y Doctorados Escuela Ambiental

Juan Felipe Botero Vega
Coordinador Maestría en Ingeniería de Telecomunicaciones

Yony Fernando Ceballos
Coordinador Doctorado en Ingeniería

Francisco Javier Bolivar Osorio
Coordinador Maestría y Doctorados en Ingeniería de Materiales

Edwin Lenin Chica Arrieta
Coordinador Maestría en Ingeniería Mecánica

Juliana Uribe Pérez
Coordinadora Doctorado en Ingeniería Electrónica y Computación

Rigoberto Ríos Estepa
Coordinador Maestría y Doctorados en Ingeniería Química

Presentación del Dossier de Investigación de Maestría y Doctorado 2025

La presente edición de Avances y tendencias en Ingeniería reúne veintidós (22) trabajos de investigación desarrollados por estudiantes de maestría y doctorado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, que dan cuenta de la diversidad temática y el rigor científico que caracterizan los programas de posgrado de la institución. Las investigaciones abarcan áreas estratégicas como la transición energética, el tratamiento de aguas y contaminantes emergentes, la economía circular, la gestión ambiental del territorio y las tecnologías de la información, evidenciando el compromiso del cuerpo estudiantil y sus grupos de investigación con la solución de problemáticas locales, nacionales y globales.

Los trabajos presentados integran enfoques cuantitativos y cualitativos, combinando herramientas de simulación computacional, diseño experimental, modelación matemática, teledetección y participación comunitaria. Entre los temas tratados se destacan la comparación de técnicas de telemetría en redes programables, la generación de energía a partir de fuentes renovables no convencionales como las olas y el vórtice gravitacional, el análisis de ciclo de vida de tecnologías fotovoltaicas emergentes, la degradación de antibióticos y contaminantes farmacéuticos en aguas residuales hospitalarias, la detección de sustancias PFAS en el río Medellín, la valorización de residuos agroindustriales mediante codigestión anaerobia, y el diseño de cadenas de suministro para la reducción del desperdicio alimentario. Estos trabajos no solo contribuyen al avance del conocimiento científico y tecnológico, sino que reflejan una vocación institucional por una ingeniería socialmente pertinente, comprometida con el desarrollo sostenible y la excelencia académica en muy adversas áreas de la ingeniería.

Este dossier demuestra que la XI Jornada Académica de Posgrados fue un éxito rotundo, reafirmando el compromiso de la Facultad de Ingeniería con la excelencia académica y la investigación. Los trabajos presentados demostraron la calidad y el impacto de la producción científica de nuestros estudiantes, consolidando a la Universidad de Antioquia como un referente en la formación de investigadores de alto nivel. Agradecemos a todos los participantes, miembros de los comités y asistentes por hacer de este evento una experiencia enriquecedora y memorable.

Comité Científico – XI Jornadas Académicas de Posgrado de la Facultad de Ingeniería

Tabla de Contenido

Análisis de desempeño de telemetría activa fuera de banda contra telemetría en banda usando INT (In-Band Network Telemetry) Autores: Osorio Henker, A.F.; Leal Piedrahita, E.A.; Gutiérrez, S.A. Grupo: GITA	7
Simulación dinámica de una política de Responsabilidad Extendida del Productor en el sector textil: impactos en la reducción de residuos y economía circular Autores: Maya Iregui, C.M.; Maya Duque, P.; Ibarra Vega, D. Grupo: ALIADO	12
Análisis de ciclo de vida aplicado a celdas solares de perovskita en escenarios prospectivos de cambio climático Autores: Quintana Pedraza, G.A.; Vieira Agudelo, S.C.; Muñoz Galeano, N. Grupo: GIGA	15
Simulación numérica del comportamiento aerotérmico de una cámara de combustión tipo flujo inverso operando con hidrógeno-amoniaco Autores: Castaño Estrada, J.D.; Colorado Granda, A.F Grupo: GASURE	19
Detecting label noise in bioacoustic datasets to improve classification model reliability Autores: Gallego Londoño, J.; López Hincapié, J.D. Grupo: SISTEMIC	23
Desarrollo de un convertidor de energía de las olas oscilante con rectificador de movimiento Autores: Gómez Cajar, J.P.; Chica Arrieta, E.L. Grupo: GEA	27
Cambio ambiental y territorial de las áreas naturales protegidas de la costa Caribe colombiana y su relación con el ordenamiento territorial Autores: Peña Mejía, K.; Aguirre Ramírez, N.J. Grupo: GeoLimna	30

Remoción de amoxicilina, ciprofloxacina y trimetoprima mediante la aplicación de procesos de ozonización en agua desionizada y residual hospitalaria

Autores: Rozo Charris, M.P.; Zuñiga, H.N.

Grupo: GDCON 34

Evaluación de la superficie de un biocompuesto de resina epoxi reforzado con fibras de fique colombiana bajo los fenómenos de erosión y cavitación para el rotor de una turbina de vórtice gravitacional

Autores: Vargas Pérez, M.J.; Chica Arrieta, E.L.

Grupo: GEA 38

Methodologies for the generation of Grover oracles: a comparative analysis

Autores: Naranjo Cano, M.Á.; Fletscher Bocanegra, L.A.

Grupo: GITA 43

Estrategias basadas en la naturaleza y las comunidades orientadas al manejo de la escorrentía superficial en la ladera nororiental de Medellín

Autores: Castaño Benítez, M.A.; Arias Gómez, P.A.; Berrouët Cadavid, L.M.

Grupo: GIGA 46

Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la fracción carbonácea del material particulado (PM) en las principales ciudades de Colombia y su relación con parámetros socio-ambientales

Autores: Franco Carvajal, S.A.; Correa Ochoa, M.A.

Grupo: GLIMA 49

Oxidación de limoneno con catalizadores obtenidos a partir de materiales carbonosos de cáscara de naranja

Autores: Perea Cuesta, A.; Villa Holguín, A.L.

Grupo: Catálisis Ambiental 53

Codigestión anaerobia de efluentes de extracción de palma de aceite y cáscaras de plátano en la región del Urabá antioqueño

Autores: Herrera Mendoza, J.E.; Vásquez Bustamante, J.E.; Rubio Clemente, A.

Grupo: Bioprocesos 57

Diseño e implementación de pilotos de captación de aguas lluvias en viviendas: una contribución para gestionar el riesgo de desastres y generar adaptación al cambio climático en viviendas de ladera en Medellín

Autores: Velásquez Cartagena, R.; Villegas Palacio, J.C.; Zapata Ochoa, J.D.

Grupo: Ecología Aplicada 61

Mitigación del drenaje ácido de minas en un patio de almacenamiento de carbón

Autores: Rojas Díaz, Y.C.; Rubio Clemente, A.; Chica Arrieta, E.L.

Grupo: GEA 64

Evaluación de la degradación fotocatalítica de diclofenaco en un reactor de flujo helicoidal usando TiO_2 -P25

Autores: Marín Orozco, A.; Peñuela, G.A.; Hincapié Mejía, G.

Grupo: GDCON 68

Monitoreo de la presencia y evaluación de riesgos de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) en el río Medellín

Autores: Baquero Ramírez, E.S.; Peñuela Mesa, G.A.

Grupo: GDCON 73

Organoleptic characteristics orientation of home brewing beer based on formulation and hopping characteristics

Autores: Londoño García, F.D.; Villa Holguín, A.L.

Grupo: Catálisis Ambiental 78

¿Cómo han cambiado las coberturas del suelo en las fronteras departamentales de Colombia? Una exploración con imágenes satelitales en el siglo XXI

Autores: De la Cruz Pinta, M.; Cañón Barriga, J.E.

Grupo: GAIA 83

Diseño geométrico del canal de entrada de una turbina de vórtice gravitacional inspirado en la cultura Nazca

Autores: Carvajal Guerra, J.; Chica Arrieta, E.L.; Rubio Clemente, A.

Grupo: GEA 87

Compatibilización y valorización de residuos de películas plásticas multicapa de poliamida/polietileno postindustria

Autores: Gómez Restrepo, L.L.; Giraldo Vásquez, D.H.

Grupo: Materiales Poliméricos 91

01

Análisis de Desempeño de Telemetría Activa Fuera de Banda Contra Telemetría en Banda Usando Int (In-Band Network Telemetry)

Andrés Felipe Osorio Henker,
Erwin Alexander Leal Piedrahita,
Sergio Armando Gutiérrez

GITA

Grupo de investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

La telemetría constituye un elemento esencial en la operación y gestión de las redes de telecomunicaciones modernas. Su función principal radica en permitir la observación continua y el control proactivo del desempeño de la infraestructura de red.

Históricamente, las herramientas de telemetría activa más empleadas han sido los mecanismos tradicionales basados en el Protocolo de Mensajes de Control de Internet, ICMP (Internet Control Message Protocol), y los Protocolo de Medición Activa: Unidireccional OWAMP (One-Way Active Measurement Protocol), y Bidireccional TWAMP (Two-Way Active Measurement Protocol). Aunque estos dos esquemas de telemetría son ampliamente difundidos por su simplicidad y bajo costo de implementación, presentan limitaciones técnicas considerables. Primero, su naturaleza es fundamentalmente de extremo a extremo; al operar ICMP en la capa de red (Capa 3) y OWAMP/TWAMP en la de transporte (Capa 4), son incapaces de proporcionar visibilidad granular sobre el estado de los dispositivos de conmutación (switches) en la capa de enlace (Capa 2) que atraviesan. Segundo, su resolución suele ser del orden de milisegundos, lo que impide capturar fenómenos transitorios de corta duración. Finalmente, en el caso de ICMP y TWAMP, la métrica del Tiempo de Ida y Vuelta, RTT (Round-Trip Time), la cual asume rutas simétricas de ida y vuelta, una condición que con frecuencia no se cumple en topologías complejas.

En este contexto, la aparición de las redes programables ha impulsado el desarrollo de mecanismos avanzados de telemetría, entre los cuales destaca la telemetría de red en banda, INT (In-band Network Telemetry). Esta tecnología permite incorporar información de medición directamente en los paquetes de datos, proporcionando visibilidad en cada dispositivo de la capa de enlace, con resoluciones del orden de microsegundos. INT representa un cambio de paradigma, ya no se trata únicamente de medir el rendimiento extremo a extremo, sino de obtener una visión interna, precisa y dinámica de cómo se comporta la red en cada salto de conmutación.

La transición desde los mecanismos de telemetría heredados hacia soluciones basadas en redes programables como INT presenta un dilema práctico para los operadores de red. Por un lado, las herramientas tradicionales ofrecen simplicidad, pero carecen de la granularidad necesaria para diagnósticos modernos. Por otro, INT promete una visibilidad sin precedentes, pero su implementación introduce una complejidad y un consumo de recursos que deben ser justificados. El problema central radica en la ausencia de un análisis comparativo riguroso entre ambos mecanismos de telemetría.

Este trabajo compara formalmente el desempeño de la latencia unidireccional (one-way) entre técnicas de telemetría tradicionales (ICMP, OWAMP) y emergentes (INT), con el fin de proveer un marco de decisión basado en evidencia que facilite a los operadores la selección de la herramienta más adecuada. Para ello, se diseñó un riguroso experimento cuyos resultados fueron evaluados mediante un Análisis de Varianza ANOVA (Analysis Of Variance). El diseño experimental se articuló en torno a una unidad experimental consistente en una topología de red integrada por tres switches, tomando como variable respuesta la latencia unidireccional. Los tratamientos se definieron mediante dos factores principales: la "Técnica de Medición", con tres niveles (ICMP, OWAMP e INT), y la "Carga Útil" (Payload), con tres niveles (pequeña, mediana y grande). La metodología se estructuró en dos fases de análisis. La primera fase consistió en un ANOVA de un factor para aislar el efecto de la "Técnica de Medición". La segunda fase implementó un ANOVA de dos factores para investigar la posible interacción entre la técnica y la carga útil.

Para la ejecución de este diseño, se implementó un testbed híbrido que emula la arquitectura de un centro de datos moderno. Este entorno se compone de una topología lineal de tres switches: dos dispositivos de borde virtuales (BMv2) en los extremos y un switch de agregación en hardware programable (Asterfusion Tofino) en el centro. La implementación de las técnicas involucró el desarrollo de scripts personalizados en Python para la inserción de estampas temporales en ICMP y OWAMP en la carga útil de los paquetes, y la programación de los switches con código P4 para la inserción de datos de telemetría INT, procesados por un colector dedicado. Con el fin de garantizar la reproducibilidad científica, todos los artefactos de software fueron publicados en un repositorio abierto.

Los resultados obtenidos al aplicar el ANOVA de un factor revelaron que la elección de la técnica de medición tiene un efecto altamente significativo sobre la latencia unidireccional ($p < 0.001$). Un análisis post-hoc mediante la prueba Tukey HSD reveló diferencias estadísticamente significativas entre las tres técnicas, estableciendo una jerarquía clara. INT presentó la menor latencia promedio, seguida por ICMP y, finalmente OWAMP. Estos resultados corroboran la hipótesis inicial de que INT ofrece un desempeño temporal superior en términos de precisión y estabilidad.

Por otro lado, el ANOVA de dos factores reveló una interacción significativa ($p < 0.05$) entre la técnica de medición y el tamaño del paquete, indicando que el impacto de este último sobre la latencia no es uniforme, sino que depende fundamentalmente de la herramienta utilizada. El análisis detallado de esta interacción mostró comportamientos marcadamente diferentes: mientras INT demostró una robustez excepcional, manteniendo una latencia prácticamente invariable frente a las variaciones del payload, ICMP exhibió una sensibilidad directa, con una latencia que aumentaba de forma consistente.

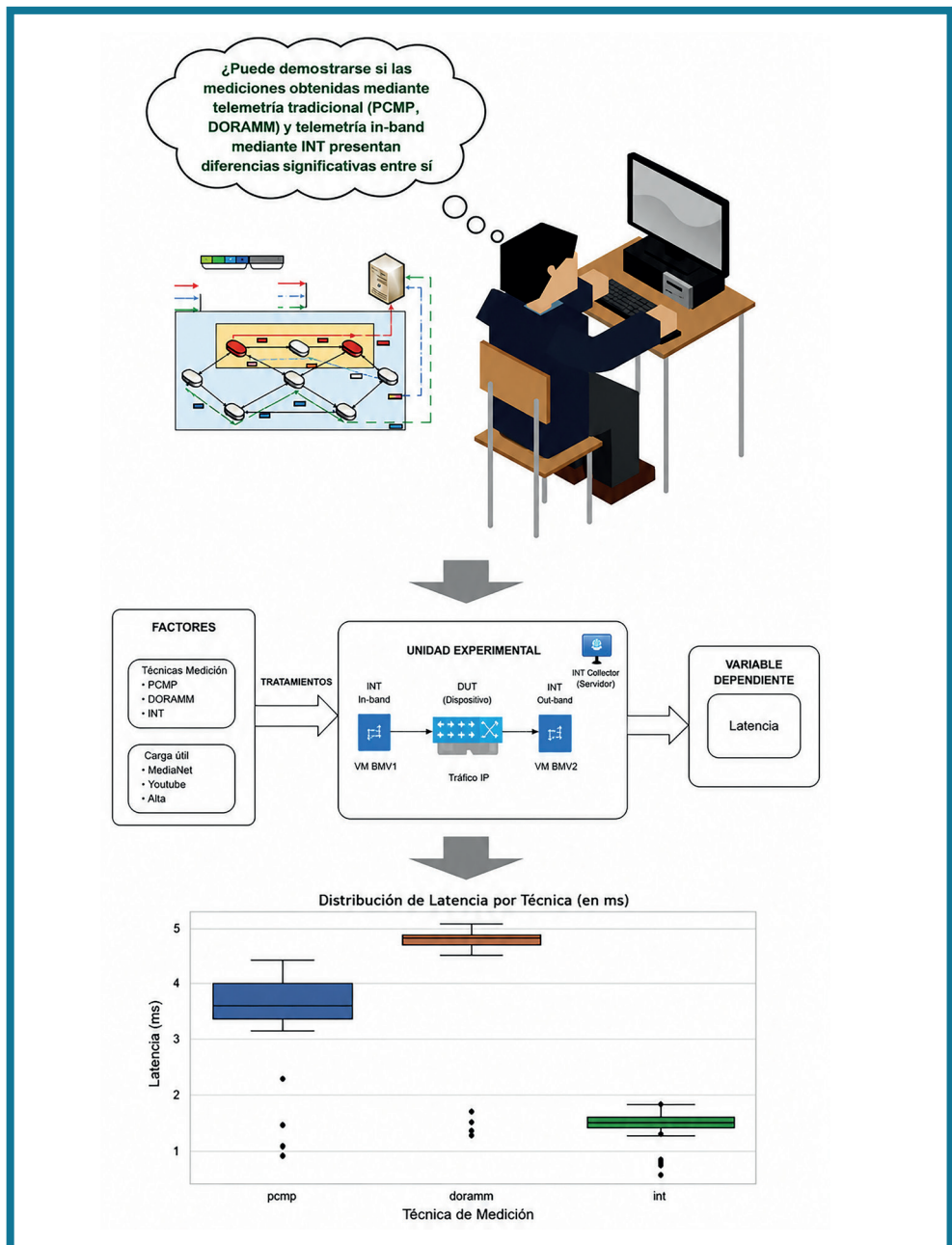
Por su parte, OWAMP no solo presentó la mayor latencia, sino también una alta variabilidad y un comportamiento impredecible, sin una correlación clara con el tamaño del paquete.

En conclusión, INT se consolida como la opción técnicamente superior para entornos que demandan visibilidad detallada y mediciones de alta resolución temporal. Sin embargo, su complejidad de implementación, que incluye modificaciones en la infraestructura de red, programación personalizada en el lenguaje P4, colectores especializados y sincronización precisa, limita su adopción a escenarios específicos donde dichas capacidades sean realmente necesarias. Por otro lado, ICMP y OWAMP continúan siendo alternativas viables para escenarios menos exigentes, pero los operadores deben considerar cuidadosamente sus limitaciones inherentes, particularmente en lo referente a la sensibilidad de ICMP al tamaño del paquete y a la alta variabilidad observada en OWAMP.

Highlights:

1. ANOVA confirma diferencias significativas entre telemetría tradicional y moderna.
2. Telemetría tradicional (ICMP, OWAMP): baja precisión y sensibilidad al payload.
3. Telemetría moderna (INT): alta precisión sin sensibilidad al payload.
4. INT: alta robustez a costa de infraestructura y programación complejas.

Resumen gráfico:



02

Simulación dinámica de una política de Responsabilidad Extendida del Productor en el sector textil: impactos en la reducción de residuos y economía circular

Catalina María Maya Iregui,
Pablo Maya Duque,
Danny Ibarra Vega

ALIADO

Grupo de investigación Analítica e Investigación para la Toma de Decisiones (ALIADO)
Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

La creciente preocupación por el impacto ambiental de la industria textil y de la confección ha impulsado la necesidad de implementar políticas de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) que promuevan la economía circular. A pesar de los avances en otros sectores, el textil enfrenta barreras regulatorias significativas.

Este estudio evalúa el impacto potencial de una REP sobre el flujo de materiales textiles posconsumo por medio de tres etapas: identificación del problema, modelación y evaluación. Para la primera, se analiza un caso de estudio de un país en desarrollo como Colombia, con datos reales. Para la segunda, se desarrolla un modelo de dinámica de sistemas por medio de un diagrama causal, un diagrama de flujos y niveles, validación y políticas. En la tercera etapa, por medio de la simulación de diferentes escenarios, se busca responder tres preguntas claves: 1) ¿Qué impacto tendría la implementación de una política de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), enfocada en aumentar la tasa de recolección selectiva de prendas, sobre la cantidad de residuos textiles dispuestos en el servicio público de aseo y en destinos no registrados?, 2) ¿Cómo se vería afectada la disposición final de residuos textiles en los próximos años si se implementan estrategias que prolonguen el tiempo de uso de una prenda por parte del consumidor, evitando su descarte prematuro? y 3) ¿Qué implicaciones tendría para la gestión de la cadena de residuos textiles el aumento en la recolección a través de una política de REP, si una parte significativa de las prendas que ingresan a canales de reúso terminan siendo descartadas posteriormente por no contar con salidas efectivas de valorización?

Los resultados muestran que el sistema actual mantiene una estructura predominantemente lineal, con altos volúmenes de residuos dispuestos en destinos no registrados y una baja valorización de materiales. Por lo tanto, se analiza el efecto de incrementar las tasas de recolección y extender el tiempo de uso de una prenda, así como el impacto de las tasas de descarte de las prendas una vez recolectadas. El análisis demuestra que, si bien la intervención en el reúso logra formalizar parte del descarte (aumentando la disposición hacia el servicio público de aseo y reduciendo la disposición no registrada), su impacto es limitado, pues las prácticas actuales transfieren la responsabilidad de generar el descarte sin cumplir con su propósito inicial.

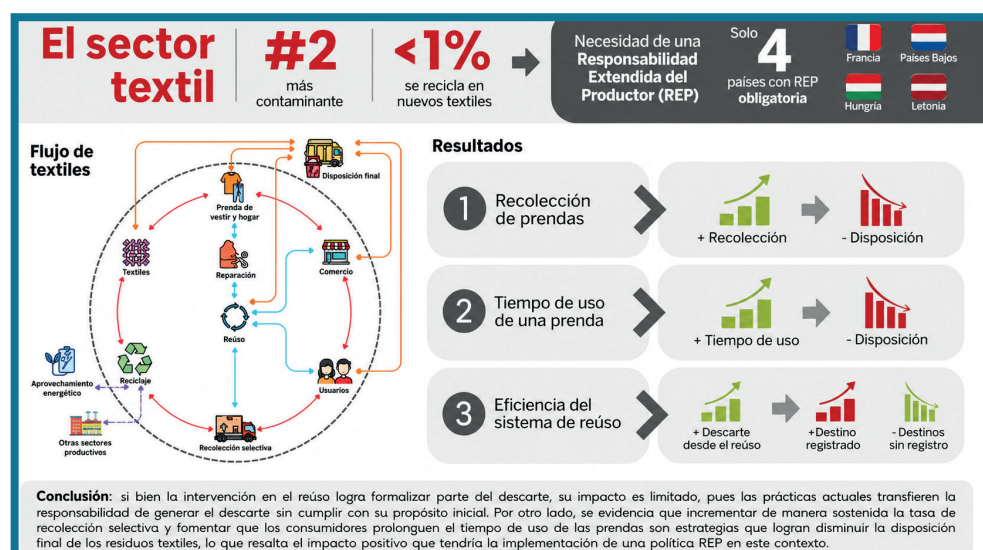
Por otro lado, los hallazgos generales evidencian que incrementar de manera sostenida la tasa de recolección selectiva y fomentar que los consumidores prolonguen el tiempo de uso de las prendas son estrategias que logran disminuir la disposición final de los residuos textiles, lo que permite concluir que la implementación de una política de REP de carácter obligatorio representa una oportunidad clave para promover la circularidad en el sector textil.

Para esto es importante tener en cuenta su impacto en la gestión de operaciones y logística que se convierte en un factor trascendental para lograr su efectividad y escalabilidad. Por lo tanto, como trabajo futuro se plantea complementar el análisis con variables que estén relacionadas con la operación y ejecución de esta política, por ejemplo, capacidades de procesamiento y almacenamiento, infraestructura mínima y costos logísticos.

Highlights:

1. El sistema textil posconsumo sigue siendo lineal, con baja circularidad.
2. Una mayor recolección selectiva reduce residuos textiles y descarte de prendas.
3. Prolongar la vida útil de la ropa reduce la disposición final de prendas.
4. El reúso real de prendas es menor al declarado, evidenciando una gran brecha.

Resumen gráfico:



03

Análisis de ciclo de vida aplicado a celdas solares de perovskita en escenarios prospectivos de cambio climático

Giovanni Andrés Quintana Pedraza,
Sara Cristina Vieira Agudelo,
Nicolás Muñoz Galeano

GIGA

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Este trabajo avanza hacia la construcción de un modelo comparativo y prospectivo de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para Celdas Solares de Perovskita (PSC) respecto a las celdas solares convencionales de silicio cristalino (c-Si). El proyecto modela escenarios (línea base, pesimista, optimista) que incorporen cambios en la matriz eléctrica, disponibilidad de agua y metales críticos, sobre la base de datos Ecoinvent basados en la información del Panel Inter gubernamental de Cambio climático (IPCC, en inglés), la Agencia Internacional de energía (AIE), Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO, en inglés) y el Banco Mundial. La unidad funcional para los ACVs es 1 kWh de electricidad generada, y se evalúan los impactos ambientales mediante IPCC-GWP100, AWARE, ReCiPe 2016 y TRACI 2.1. El modelado se implementará en OpenLCA siguiendo la metodología contemplada en las ISO 14001 y 14044.

Para el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) se han determinado 3 arquitecturas representativas de PSC provenientes de la literatura y con rutas de fabricación realistas: (i) n-i-p basado en TiO_2 (Compacto/mesoporoso), perovskita mixta y HTL Spiro-OmeTAD o variante Carbon-based sin HTL; (ii) p-i-n (invertida); y (iii) tandem PSC/Si (subcelda p-i-n sobre Si industrial). Estas 3 configuraciones de PSC representan la mayor escalabilidad y permiten comparar rutas de baja temperatura, con menor potencial de consumo energético y mejor utilización de tinta/solvente.

El conjunto de PSC escogidas integra: (i) n-i-p con electrodo de carbono, que sustenta la sensibilidad $\text{Au} \rightarrow \text{C}$ en el contacto posterior y aporta órdenes de magnitud realistas para consumos de solventes/energía en laboratorio; (ii) p-i-n donde documenta secuencias, tiempos y temperaturas de proceso (limpieza, deposiciones, curados) para poblar los procesos de primer plano (ETL/absorbedor/HTL/contactos); y (iii) tandem PSC/Si, base de consenso para wafer $\rightarrow$ celda $\rightarrow$ módulo de c-Si y punto de referencia metodológico. A partir de estas tres fuentes se consolidan plantillas de extracción e inventarios paramétricos en openLCA, mapeados a Ecoinvent y listos para ser adaptados por escenario.

La construcción de escenarios sigue el planteamiento metodológico de la propuesta: Línea base (2025) con condiciones actuales de red eléctrica y abastecimiento hídrico; Pesimista, con mayor intensidad de carbono, restricciones hídricas y limitaciones de metales (Pb/Sn) que elevan rechazos y pérdidas; y Optimista, con mix eléctrico descarbonizado, mejoras en PCE y

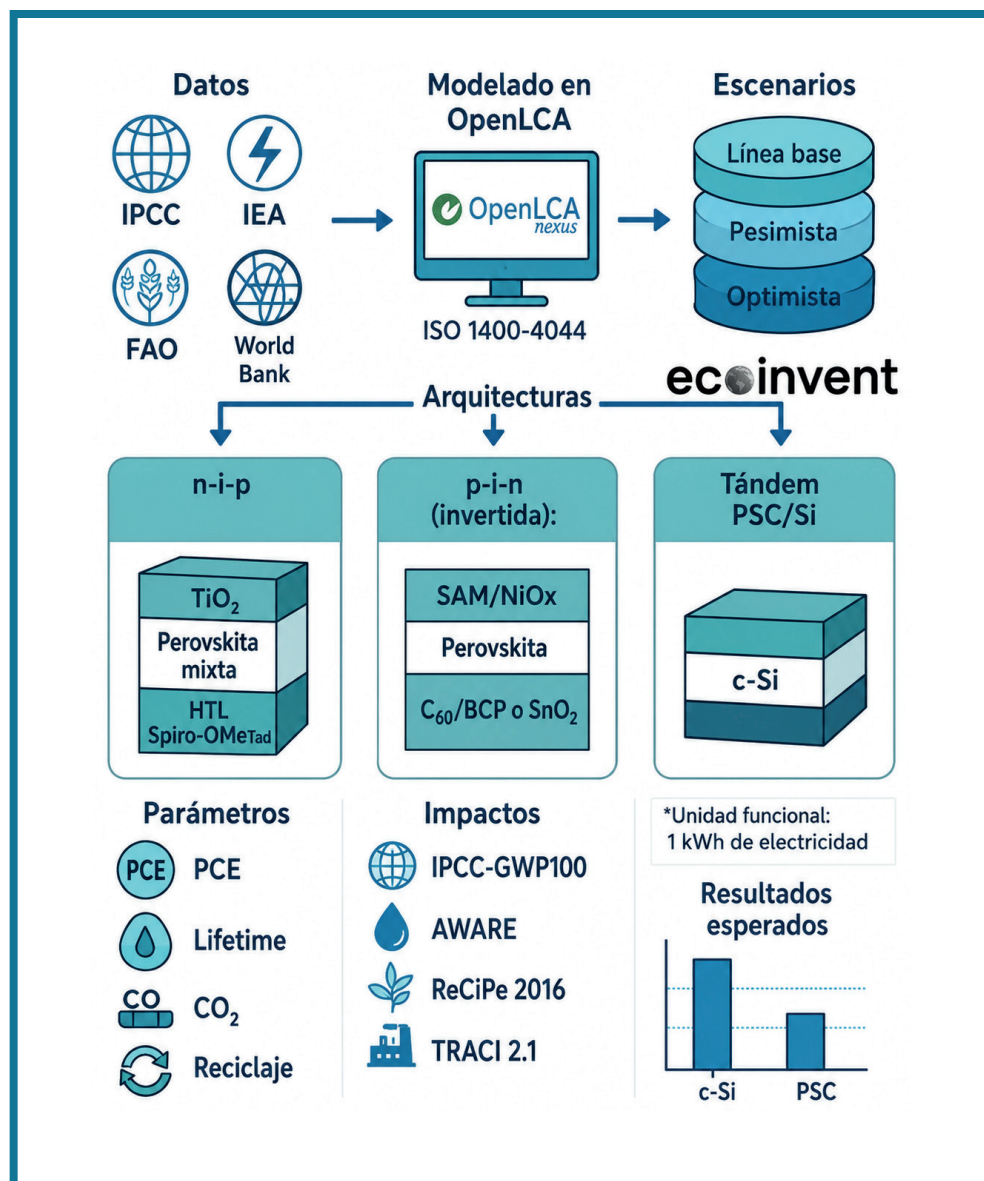
extensión de vida útil gracias a encapsulados/curados más eficientes y control de defectos. Estas variaciones se aplican mediante parámetros globales (PCE, vida útil, intensidad de carbono, tasas de recuperación/reciclaje, defectos y retrabajo), de forma que cada corrida sea auditada y replicable.

Se espera que los resultados confirmen tres patrones: (1) electricidad de proceso y precursores clave (p. ej., PbI_2 y solventes) como hotspots del GWP en PSC; (2) dependencia marcada del estrés hídrico regional en AWARE, especialmente para cadenas químicas y electricidad aguas arriba; y (3) alta sensibilidad de los impactos normalizados por kWh a PCE y vida útil. En el escenario optimista, la combinación de rutas de baja temperatura, mix de baja huella, mejor PCE y gestión de agua debería traducirse en reducciones sustanciales de GWP y, en contextos con escasez hídrica, también de AWARE. Frente a c-Si (tecnología madura), se anticipa que PSC pueda cerrar brechas o mejorar en categorías específicas si se materializan las mejoras de proceso y estabilidad planteadas por el escenario.

Highlights:

1. Tres arquitecturas PSC: n-i-p, p-i-n y tandem PSC/Si.
2. Escenarios con IPCC/IEA/FAO/World Bank y Ecoinvent.
3. Indicadores: GWP100, AWARE, ReCiPe 2016 y TRACI 2.1.

Resumen gráfico:



04

Simulación numérica del comportamiento aerotérmico de una cámara de combustión tipo flujo inverso operando con hidrógeno-amoniaco

Joey Daniel Castaño Estrada,
Andrés Felipe Colorado Granda

GASURE

Grupo de Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE)
Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Este proyecto de investigación se centra en el desarrollo y la validación de un modelo numérico de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para analizar la combustión de mezclas de hidrógeno (H_2) y amoníaco (NH_3) en una cámara de combustión de flujo inverso, representativa de una microturbina de gas.

La transición energética global hacia un modelo sostenible y bajo en carbono ha impulsado una intensa búsqueda de vectores energéticos alternativos que puedan reemplazar a los combustibles fósiles. En este escenario, el H_2 y el NH_3 han ganado un protagonismo significativo, al ser combustibles libres de carbono cuya combustión no genera dióxido de carbono (CO_2). El hidrógeno, con su altísimo poder calorífico y reactividad, se posiciona como un pilar de la futura economía energética; sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta barreras logísticas considerables debido a su baja densidad volumétrica, lo que complica su almacenamiento y transporte de forma segura y económica. Para superar estos desafíos, el amoníaco se presenta como un excepcional portador de hidrógeno, gracias a su mayor densidad energética y a su capacidad de ser licuado a presiones moderadas, beneficiándose además de una infraestructura global de producción y distribución ya consolidada.

A pesar de su potencial, la combustión de mezclas H_2 - NH_3 presenta importantes desafíos técnicos: la baja reactividad intrínseca del amoníaco puede llevar a inestabilidades de la llama y apagado (blow-off), mientras que la alta reactividad del hidrógeno introduce riesgos de retroceso de llama (flashback). Adicionalmente, el átomo de nitrógeno en la molécula de amoníaco actúa como precursor del "NOx de combustible", generando emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) que deben ser controladas rigurosamente. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) ha emergido como una herramienta indispensable para el diseño y optimización de estas cámaras de combustión, pero su fiabilidad depende críticamente de la correcta selección de los modelos numéricos implementados. En el campo de la combustión de H_2 - NH_3 , persiste una falta de consenso sobre qué combinación de modelos de turbulencia, modelos de interacción turbulencia-química y, fundamentalmente, mecanismos de reacción cinética, ofrece predicciones precisas bajo las condiciones operativas de una microturbina de gas, lo cual limita el uso del CFD como una herramienta predictiva confiable.

El objetivo general de este proyecto es, por tanto, analizar el comportamiento aerodinámico y termoquímico de estas mezclas, y para lograrlo, el aporte central será la validación rigurosa de una metodología de simulación CFD contra datos experimentales de alta fidelidad obtenidos en el quemador de flujo inverso de 20 kW de la Université libre de Bruxelles (ULB), una instalación de vanguardia con acceso óptico.

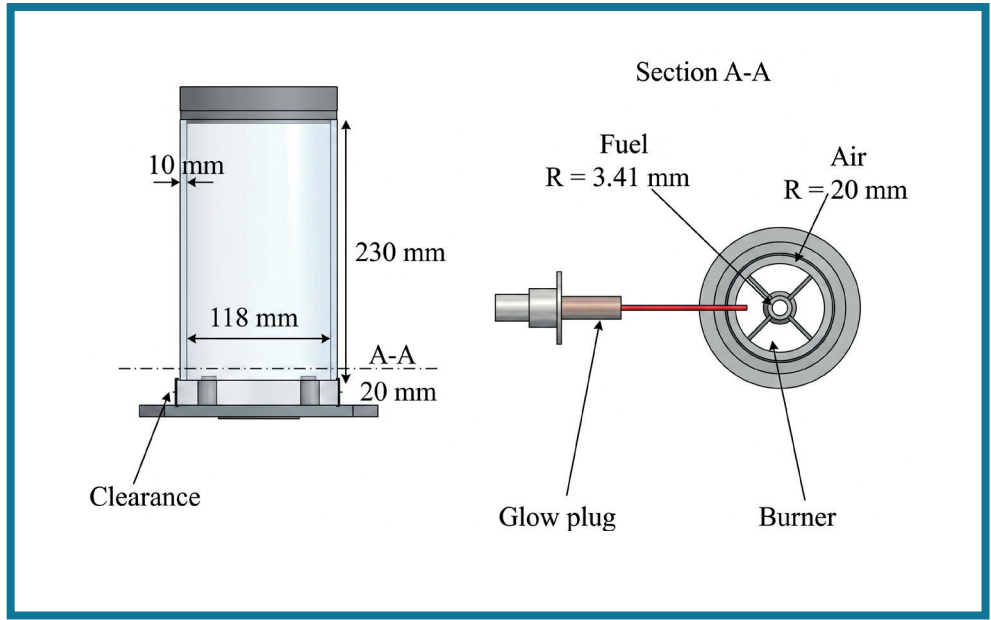
La metodología se estructura en fases: inicialmente, se replicará numéricamente un caso de estudio de combustión de hidrógeno puro, utilizando los propios archivos de simulación (.cas y .dat) proporcionados por la ULB para verificar la correcta implementación de la geometría, la malla y los modelos físicos. Posteriormente, se aplicará esta metodología validada para simular los casos de combustión de mezclas H_2-NH_3 , comparando los resultados con los datos experimentales correspondientes para evaluar la capacidad predictiva de distintos modelos cinéticos y de turbulencia.

Se espera que los resultados contribuyan significativamente al conocimiento científico sobre los fenómenos de combustión de mezclas H_2-NH_3 y sienten las bases para el diseño de cámaras de combustión de bajas emisiones. Adicionalmente, el proyecto fortalecerá la cooperación académica internacional entre la Universidad de Antioquia y la ULB, esperando que esta colaboración resulte en la preparación y sometimiento de al menos un artículo científico en una revista de alto impacto (cuartil Q1 o Q2), en coautoría con los investigadores de ambas instituciones.

Highlights:

1. Simulación CFD de la combustión de H_2-NH_3 en un quemador de flujo inverso.
2. Validación de modelos numéricos con datos experimentales de un quemador de 20 kW.
3. Análisis de la estructura de la llama y las rutas de formación de NO_x .
4. Desarrollo de una herramienta predictiva para el diseño de quemadores limpios.

Resumen gráfico:



05

Detecting label noise in bioacoustic datasets to improve classification model reliability

Jonathan Gallego Londoño,
José David López Hincapié

SISTEMIC

Grupo de Investigación Sistemas Embebidos e Inteligencia Computacional (SISTEMIC)
Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Advances in artificial intelligence have enabled the development of bioacoustic computational models to analyze species presence in audio recordings, leveraging the vast amount of data generated by passive acoustic monitoring (PAM) campaigns. However, the effectiveness of these algorithms critically depends on the accuracy of the annotations (segments or bounding boxes) used for training and evaluation. The process of labeling animal sounds is a challenging, subjective, and time-consuming task, even for experts. Factors such as background noise interference, acoustic similarity between vocalizations, annotator fatigue, and overlapping sounds contribute to a non-trivial error rate.

These labeling errors, often referred to as "label noise," have significant consequences. They can degrade the learning efficiency and generalization capabilities of models, skew performance metrics, obstruct objective comparisons between different models, and distort estimates of species prevalence. Unlike large datasets in computer vision, bioacoustic datasets tend to be smaller and more expensive to annotate, making them particularly vulnerable to these adverse effects. While methods have been proposed to accelerate labeling (such as active learning or semi-automatic annotation), a critical gap exists in the literature: the lack of systematic post-hoc auditing methods to verify and correct the reliability of existing labels.

To address this issue, we present a novel auditing methodology designed to identify potential labeling errors in animal audio segments. The method consists of three stages. First, feature extraction. For each labeled audio segment, we extract a set of 33 acoustic features designed to capture the unique signature of the vocalization. These include bounding box descriptors (duration, minimum/maximum frequency), spectral features (dominant frequency, spectral centroid, spectral flatness), and a set of 23 linear-scale cepstral coefficients, which summarize the spectral envelope and timbre.

Second, dimensionality reduction. To mitigate the curse of dimensionality and improve interpretability, we apply a selection and reduction process. Initially, we remove redundant features using Spearman correlation ($\rho > 0.85$). We then assess the data's suitability for factorization using the Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) test, iteratively discarding features with an individual KMO below 0.4. Finally, we apply Factor Analysis with Varimax rotation (preferred over PCA for its interpretability) to condense the remaining features into a set of latent variables that explain most of the data's covariance.

Third, isolated observation detection. We use these latent variables to perform agglomerative hierarchical clustering, employing Ward's minimum variance method and Euclidean distance. Instead of forming a fixed number of clusters, we analyze the order of the "leaves" in the resulting dendrogram. We developed an algorithm that flags a segment as an "isolated observation" if it is flanked in the dendrogram by segments assigned to different species. The isolation distance is quantified by counting the number of leaves from different labels that intervene until the nearest neighbor of the same label is found. This allows for prioritizing the most atypical cases for efficient expert review, exporting the results directly as a Raven selection table.

We validated the tool on three bioacoustic datasets (Subsets A, B, and C) from two locations in Colombia, which vary in species diversity (anurans, birds, and primates), recording conditions, and labeling methods. Subset A (Manual) included 1,465 manually labeled segments by experts. Subset B (Manual) comprised 329 manually labeled segments where experts reported ambiguities. Subset C (Semi-automatic) consisted of 1,382 segments automatically generated by a convolutional neural network (DenseNet) trained on Subset A's labels.

When applying our method to the original data, an average of 10% of the labels were flagged as potential errors. In an expert re-verification of these flagged labels, it was confirmed that up to 73% of them were incorrect (mislabelled, noise, or empty segments), demonstrating the method's effectiveness in identifying actual errors.

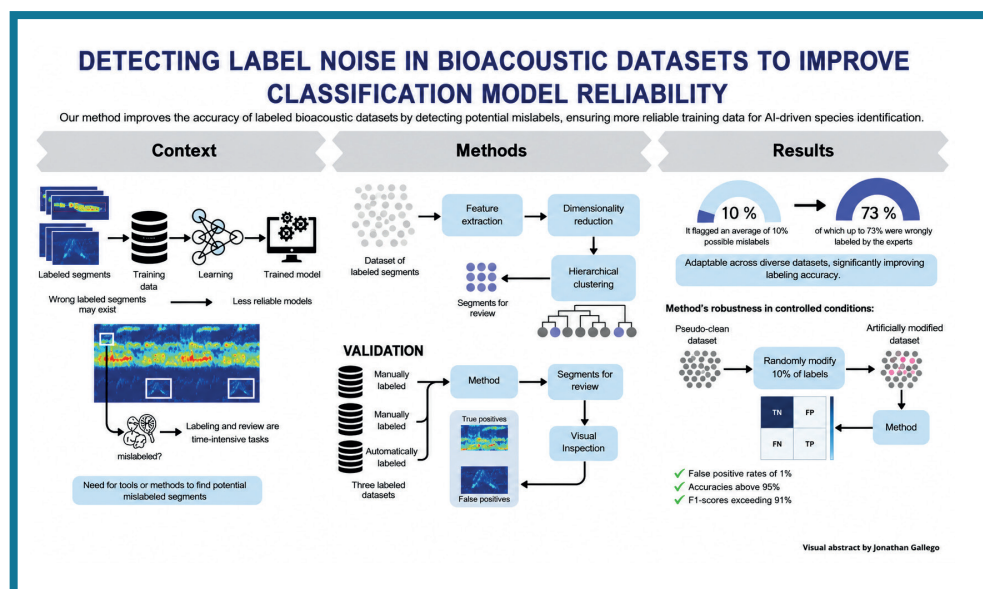
To test robustness under controlled conditions, we created "pseudo-clean subsets" (PC-subsets) by removing all initially flagged labels. We then generated "artificially modified subsets" (AM-subsets) by intentionally corrupting 10% of the labels in the PC-subsets. When running our tool on these AM-subsets (in a 10-fold cross-validation), our method proved highly accurate in finding the introduced errors: it achieved a false positive rate of only 1%, with accuracies above 95% and F1-scores exceeding 81%. Furthermore, a proof-of-concept classification experiment (using SVM) confirmed that models trained on the "pseudo-clean" data (PC-subsets) outperformed those trained on the original noisy datasets.

This method significantly enhances labeling accuracy and fosters the creation of more reliable training datasets for machine learning models. Its broad applicability across diverse data types (manual or semi-automatic) makes it a promising tool for improving the quality of bioacoustic research, reducing expert review effort, and ensuring more robust ecological analyses, ultimately contributing to better species monitoring and conservation strategies.

Highlights:

1. A method was developed to detect misassigned strong labels in bioacoustic datasets.
2. Mislabels identified via clustering after feature extraction & dimensionality reduction.
3. The method was validated on three diverse, multi-taxa datasets with consistent results.
4. Approach enhances reliability of strong labels for training & evaluating models.

Resumen gráfico:





Desarrollo de un convertidor de energía de las olas oscilante con rectificador de movimiento

Juan Pablo Gómez Cajar,
Edwin Lenin Chica Arrieta

GEA

Grupo de Energía Alternativa (GEA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

La energía undimotriz o energía proveniente del movimiento de las olas, representa una de las fuentes renovables más prometedoras debido a su alta densidad energética y disponibilidad constante en los océanos. Sin embargo, su aprovechamiento aún enfrenta desafíos técnicos significativos. Los actuales sistemas de conversión de energía undimotriz (WEC, por sus siglas en inglés) presentan una eficiencia limitada, con tasas de captura y conversión que rara vez superan el 40 % en aplicaciones a gran escala. Esta baja eficiencia, sumada a los elevados costos de instalación y mantenimiento, ha frenado su adopción frente a tecnologías más consolidadas como la solar y la eólica.

Con el fin de abordar estas limitaciones, recientes investigaciones han explorado la incorporación de mecanismos innovadores dentro del diseño de los WEC. Entre las propuestas más destacadas se encuentra la integración de rectificadores de movimiento mecánico (MMR) y volantes de inercia. El MMR permite transformar el movimiento alternante de las olas en un movimiento unidireccional más estable, ideal para accionar generadores eléctricos de manera eficiente. Por su parte, los volantes de inercia actúan como sistemas de almacenamiento de energía cinética a corto plazo, suavizando la entrega de potencia y proporcionando una salida energética más constante ante las fluctuaciones del oleaje.

El desarrollo y análisis de estos sistemas se apoyan en el uso combinado de herramientas computacionales avanzadas y métodos experimentales. Herramientas como Matlab permiten construir modelos predictivos del comportamiento dinámico del sistema. De forma complementaria, las simulaciones en ANSYS Fluent sirven para analizar la interacción fluido-estructura y comprender con mayor detalle los fenómenos hidrodinámicos involucrados. Finalmente, las pruebas de laboratorio con prototipos físicos permiten validar los modelos numéricos y ajustar los resultados teóricos, consolidando una metodología integral que combina simulación y experimentación para avanzar hacia sistemas de conversión más eficientes.

Desde el punto de vista ambiental y energético, la optimización de los sistemas WEC tiene un papel clave en la transición hacia una matriz energética sostenible. En el caso colombiano, donde el potencial marítimo aún está subexplotado, la incorporación de tecnologías undimotrices podría diversificar las fuentes de generación y reducir la dependencia de combustibles fósiles. Estas iniciativas se enmarcan en las políticas nacionales como la Ley 1715 de 2014 y la Ley 2099 de 2021, que promueven el uso de energías renovables no convencionales y el desarrollo de tecnologías limpias.

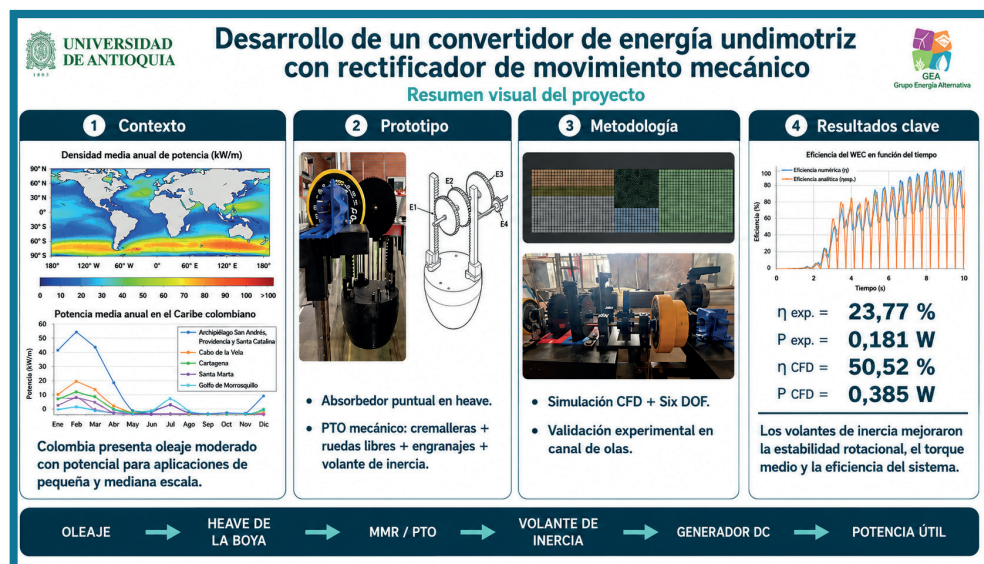
La mejora de la eficiencia de los WEC mediante la incorporación de componentes mecánicos como el MMR y los volantes de inercia abre un nuevo horizonte para el aprovechamiento de la energía del mar. Más allá del avance tecnológico, estos desarrollos impulsan la formación de capacidades científicas y técnicas, fomentan la innovación industrial y fortalecen la colaboración entre el sector académico y el productivo.

En síntesis, la evolución de los sistemas undimotrices representa un paso significativo hacia la transición energética global y regional, combinando ingeniería, sostenibilidad y ciencia aplicada para transformar el movimiento de las olas en una fuente de energía estable, limpia y económicamente competitiva.

Highlights:

1. Impulso a la transición energética sostenible en el contexto colombiano.
2. Análisis hidrodinámico de sistemas oscilantes mediante modelado computacional.
3. Caracterización dinámica del convertidor oscilante mediante modelos analíticos.
4. Evaluación de desempeño energético bajo condiciones simuladas en laboratorio.

Resumen gráfico:



07

Cambio ambiental y territorial de las áreas naturales protegidas de la costa Caribe colombiana y su relación con el ordenamiento territorial

Kateryn Peña Mejía,
Néstor Jaime Aguirre Ramírez

GEOLIMNA

Grupo de Investigación GeoLimna

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Colombia desde el año 2000 es catalogada según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – UNEP, como el segundo país con mayor biodiversidad del mundo, gracias a su número total de especies y el grado de endemismo que estas presentan (Williams, 2001). La mega diversidad como la define la UNEP que posee Colombia, se debe a sus características geográficas, geológicas, geomorfológicas, climáticas e hidrológicas que en conjunto permiten el sustento de los ecosistemas y de toda la biodiversidad que estos albergan. Por lo anterior la delimitación de Áreas Naturales Protegidas – ANP es de suma importancia para la generalidad del territorio colombiano, ya que estas son las encargadas de proteger, reglamentar, regular y controlar toda la naturaleza que necesita el país para el cuidado de sus recursos naturales, sin embargo, la delimitación de las mismas ha sido todo un desafío, ya que los criterios para crear las ANP se basan en tres fases generales, de las cuales solo una de ellas está orientada a la caracterización de los elementos naturales que componen el ANP (Perez & Zambrano, 2009), sin darle gran relevancia a los factores antrópicos amenazantes como lo son el turismo, la construcción de vías, la expansión urbana, el aumento de la frontera agrícola y ganadera entre otros.

Actualmente las ANP hacen parte fundamental del ordenamiento territorial, aportando límites espaciales para la conservación de diferentes elementos naturales que proveen servicios ecosistémicos vitales para la sociedad. Colombia cuenta actualmente con 1.483 áreas protegidas lo cual equivale aproximadamente al 15,24% de todo el territorio nacional y están distribuidas en las 5 regiones naturales de Colombia (RUNAP, 2023) sin embargo, la distinción que hacen estas regiones naturales y sus múltiples subdivisión es un determinante representativo para el método de delimitación existente, esto ocasiona que las regiones naturales con borde de costa o con ecosistemas selváticos no cuenten con características de delimitación especiales que surgen a partir no solo de su biodiversidad sino también de sus procesos sociales y territoriales, dichas características son impulsores fundamentales para la conservación y/o el detrimento de las áreas protegidas a futuro. Lo anterior se debe a que la biodiversidad de una región natural conlleva una gran importancia para la conservación de áreas protegidas. Los ecosistemas selváticos y las regiones costeras a menudo albergan una amplia variedad de especies, muchas de las cuales pueden ser endémicas o en peligro de extinción. Estas áreas actúan como refugios para la biodiversidad y son esenciales para la preservación de los hábitats naturales. Por lo tanto, la presencia de abundante biodiversidad en la delimitación de las áreas naturales protegidas garantiza su conservación a largo plazo.

Los procesos sociales y territoriales también desempeñan un papel crucial en la conservación de áreas protegidas. Las interacciones humanas con el entorno natural, incluyendo actividades como la agricultura, la urbanización, la extracción de recursos naturales y el turismo, pueden tener un impacto significativo en los ecosistemas y la biodiversidad. Por lo tanto, comprender los procesos sociales y territoriales en una región específica permite identificar las amenazas potenciales para las áreas protegidas y diseñar estrategias de conservación adecuadas.

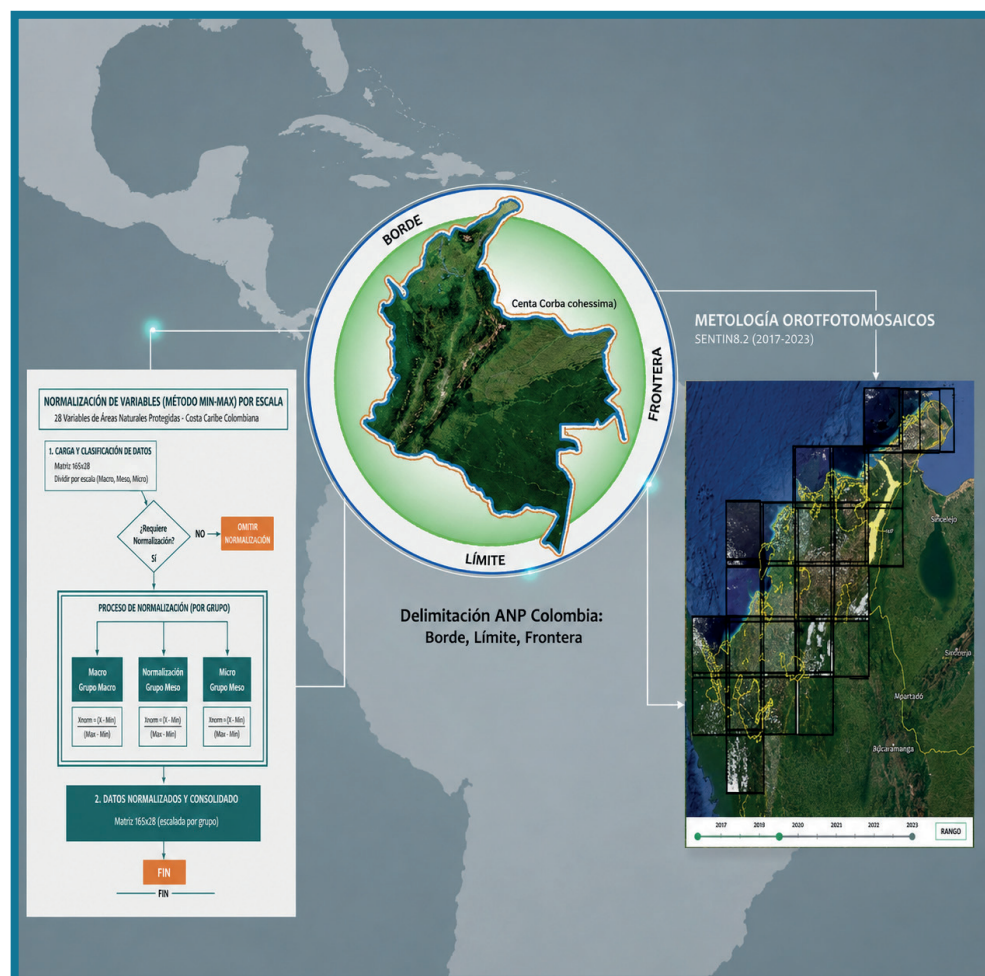
Por lo anterior el objetivo principal de esta investigación es determinar el cambio ambiental y territorial de las áreas naturales protegidas de la costa caribe colombiana y su incidencia en el ordenamiento territorial. Mediante la generación de un modelo de delimitación espacial multitemporal que con diferentes pesos de variables ambientales y territoriales sea un insumo para la propuesta de lineamientos ambientales que permitan un manejo y conservación adecuados de las ANP de la costa caribe colombiana, esperando así una relación positiva entre el cambio ambiental y territorial de las áreas naturales protegidas y el ordenamiento territorial. Se espera que un ordenamiento territorial efectivo, que considere la protección y conservación de las ANP, contribuya a reducir el cambio ambiental negativo y a mantener la integridad de los ecosistemas presentes en la costa caribe colombiana.

Gran parte de esta caracterización se llevará a cabo a través de la recopilación de imágenes satelitales, con una posterior clasificación de cobertura terrestre supervisada que además de dar cuenta del cambio de la cobertura terrestre, permite hacer una clasificación homologable con todo el territorio colombiano. En segunda medida se busca desarrollar un modelo predictivo que dé cuenta del comportamiento y la relación entre diversas variables territoriales con determinantes ambientales y de esta forma proponer el límite espacial adecuado, marcando así las necesidades de conservación y su relación con los factores antrópicos que siempre han formado parte del territorio. Como tercera y última medida se realizará una relación de la delimitación de áreas protegidas con el ordenamiento territorial y su incidencia en las disposiciones legales y territoriales que ejercen sobre estas, logrando así una recopilación de lineamientos en clave del ordenamiento territorial para áreas naturales protegidas que promuevan el desarrollo sostenible y sustentable del territorio.

Highlights:

1. Delimitación de ANP en Colombia: Un desafío conceptual entre borde, límite y frontera.
2. Base de datos con 165 ANP y 28 variables lista para análisis estadístico.
3. Metodología Ortofotomosaicos Sentinel-2 (2017-2025) de 165 ANP de la Costa Caribe colombiana.

Resumen gráfico:



08

Remoción de amoxicilina, ciprofloxacina y trimetoprima mediante la aplicación de procesos de ozonización en agua desionizada y residual hospitalaria

María Paula Rozo Charris,
Henry Nelson Zuñiga

GDCON

Grupo de Investigación Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

El aumento del consumo de antibióticos como la amoxicilina, la ciprofloxacina y la trimetoprima ha generado una acumulación significativa de estos compuestos en diferentes matrices acuosas, incluyendo aguas residuales municipales y hospitalarias. Estos medicamentos, ampliamente usados en tratamientos clínicos, no son completamente metabolizados por el organismo, lo que conduce a su excreción parcial y posterior arribo a los sistemas de tratamiento de aguas, los cuales no están diseñados para eliminar compuestos de este tipo, por lo que una porción significativa de antibióticos persiste en el efluente y es liberada en aguas superficiales, como ríos, lagos y mares, lo que implica que de una u otra manera pueden llegar al agua potable que consumimos nuevamente.

Una de las consecuencias más críticas de este fenómeno es la propagación de la resistencia antimicrobiana, las bacterias expuestas de manera continua a concentraciones de antibióticos pueden desarrollar mutaciones que las hacen resistentes a estos medicamentos lo que se traduce en un problema de salud pública que reduce la eficacia de los antibióticos, complica los tratamientos médicos y eleva los costos asociados a la atención en salud.

Este problema, catalogado por la OMS como una amenaza global, resalta la necesidad de desarrollar estrategias efectivas que reduzcan la presencia de antibióticos en las descargas hospitalarias como las tecnologías avanzadas de oxidación que se basan en la generación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), que presentan un alto potencial de oxidación y permiten degradar de forma no selectiva compuestos orgánicos recalcitrantes. Entre las TAO, la ozonización y sus variantes combinadas con peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta destacan por su capacidad para producir oxidaciones directas a través del ozono molecular e indirectas mediante radicales libres. Se ha encontrado en investigaciones previas que este método es eficiente en la degradación de fármacos y otros contaminantes emergentes, aunque la eficiencia de los procesos depende fuertemente del pH, la dosis de oxidante, la composición de la matriz acuosa y el tiempo de contacto.

En este contexto, la investigación se orienta a responder la pregunta: ¿en qué porcentaje los procesos de ozonización, ya sea de manera individual o combinados con agentes oxidantes y radiación ultravioleta, permiten la eliminación simultánea de amoxicilina, ciprofloxacina y trimetoprima en matrices reales de aguas residuales hospitalarias? Para abordar este interrogante, se establece como objetivo principal determinar la eficiencia de las tecnologías de oxidación O_3 , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ y O_3/UV en la remoción de los antibióticos seleccionados, considerando el efecto de los parámetros de operación (pH, tiempo de reacción, Concentración de ozono) y la cinética de reacción de los efluentes tratados.

La metodología desarrollada tiene un enfoque cuantitativo y experimental, orientada a evaluar la eficiencia de diferentes procesos de ozonización en la eliminación simultánea de los antibióticos amoxicilina, ciprofloxacina y trimetoprima presentes en aguas residuales hospitalarias. Para ello, se utilizaron muestras reales recolectadas en una institución de salud de Medellín, previamente caracterizadas fisicoquímicamente siguiendo los métodos estandarizados de la APHA-AWWA-WEF.

La fase experimental se realizó empleando un generador de ozono previamente calibrado y las mediciones realizadas se hicieron mediante un sistema Acquity UPLC (Waters Corporation) acoplado a un espectrómetro de masas de triple. Inicialmente se efectuaron pruebas preliminares para establecer las dosis de ozono y los rangos de pH que permitieran obtener remociones significativas. Posteriormente, se aplicó un diseño central compuesto de cara centrada con dos factores concentración de ozono y pH, para identificar las condiciones óptimas del proceso y evaluar la interacción entre las variables. Finalmente, se llevaron a cabo experimentos adicionales con la adición de peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta, con el propósito de analizar la existencia de efectos sinérgicos sobre la eficiencia de eliminación y la velocidad de degradación.

Los resultados obtenidos hasta el momento demuestran que los procesos de oxidación avanzada basados en ozono generan una alta eficiencia en la eliminación de los antibióticos amoxicilina, ciprofloxacina y trimetoprima presentes en la matriz seleccionada. En la fase inicial de experimentación, se evaluaron diferentes dosis de ozono (0.9, 1.2 y 1.5 mg/L) a pH 7, observando que concentraciones superiores a 0.9 mg/L incrementan significativamente la velocidad de degradación de los tres compuestos, alcanzando remociones superiores al 80% en los primeros 60 minutos de reacción.

En la fase de optimización, mediante el diseño central compuesto de cara centrada con dos factores (concentración de ozono y pH), se determinó que el pH y la dosis de ozono son variables críticas para maximizar la eficiencia del proceso. Las condiciones óptimas se establecieron en una concentración de ozono de 1.04 mg/L y un pH de 6.2, bajo las cuales se logró una remoción promedio del 89% de los antibióticos, confirmando la reproducibilidad del proceso con tres réplicas independientes.

Posteriormente, se evaluó el efecto de la adición de peróxido de hidrógeno (0.74 mg/L) y radiación ultravioleta (254 nm) sobre la eficiencia del sistema. Todos los tratamientos que incluyeron ozono lograron remociones superiores al 85%, pero las combinaciones $O_3/H_2O_2/UV$ mostraron una cinética de degradación más rápida, reduciendo el tiempo requerido para alcanzar el equilibrio

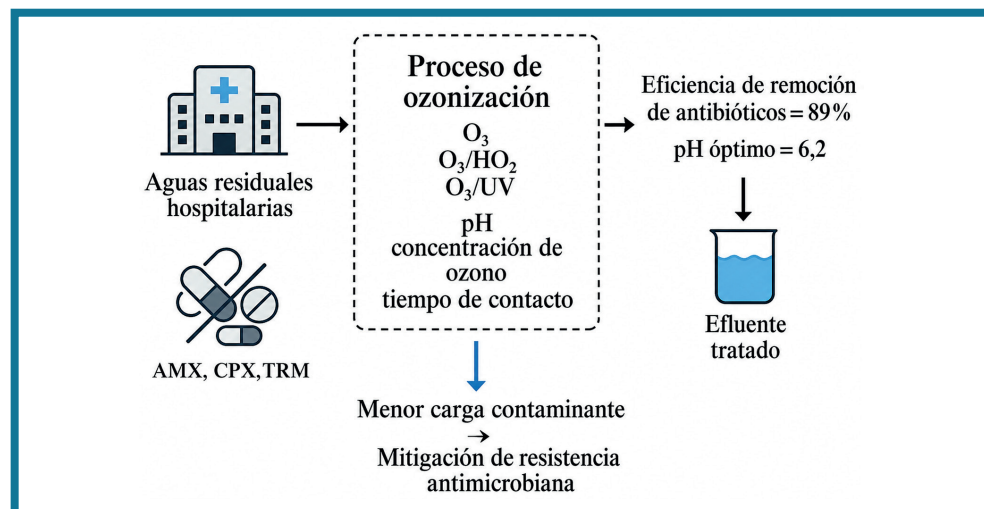
y mejorando la estabilidad del proceso frente a variaciones de la matriz. Estos resultados indican un efecto matriz entre los oxidantes, atribuible a la mayor generación de radicales hidroxilos ($\bullet\text{OH}$), los cuales aceleran la descomposición de las moléculas orgánicas complejas.

El estudio demuestra que la ozonización, tanto individual como en combinación con peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta, constituye una estrategia eficaz para la eliminación simultánea de amoxicilina, ciprofloxacina y trimetoprima en aguas residuales hospitalarias. Las condiciones óptimas determinadas (1.04 mg/L de ozono y pH 6.2) permiten alcanzar eficiencias de remoción cercanas al 89% con alta estabilidad y reproducibilidad. Estos hallazgos aportan un conocimiento valioso para el diseño y optimización de sistemas de tratamiento orientados a la eliminación de contaminantes emergentes, consolidando el papel de las tecnologías avanzadas de oxidación como una herramienta esencial en la gestión sostenible de aguas residuales hospitalarias y en la lucha contra la resistencia antimicrobiana.

Highlights:

1. Ozonización elimina antibióticos en aguas residuales hospitalarias.
2. $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ y O_3/UV aceleran la degradación y mejoran la eficiencia.
3. Condiciones óptimas: 1.04 mg/L de O_3 y pH 6.2.

Resumen gráfico:





Evaluación de la superficie de un biocompuesto de resina epoxi reforzado con fibras de fique colombiana bajo los fenómenos de erosión y cavitación para el rotor de una turbina de vórtice gravitacional

María José Vargas Pérez,
Edwin Lenin Chica Arrieta

GEA

Grupo de Energía Alternativa (GEA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

En el contexto actual de desarrollo sostenible y búsqueda de materiales con menor impacto ambiental, los biocompuestos reforzados con fibras naturales se han convertido en una alternativa prometedora para diversas aplicaciones industriales. Esta investigación se centra en la evaluación del comportamiento superficial de un biocompuesto elaborado con resina epoxi y reforzado con fibras de fique colombiana, sometido a fenómenos de erosión y cavitación, con la finalidad de determinar su viabilidad para ser utilizado como material para el rotor de una turbina de vórtice gravitacional.

El estudio parte de la fabricación del biocompuesto mediante infusión al vacío, empleando tres capas de tela de fique impregnadas con 50 gramos de resina epoxi. Este método asegura una distribución homogénea de la matriz y minimiza la inclusión de aire. Posteriormente, se sometieron probetas circulares a ensayos combinados de cavitación y erosión, usando un dispositivo de disco rotatorio que simula las condiciones de operación en un entorno hídrico con sedimentos abrasivos. El ensayo duró 4 horas, con una rotación del 18% de la capacidad máxima del equipo y partículas de arena de 850 micras, con el objetivo de replicar las condiciones extremas a las que estaría expuesto el material en un entorno real.

La caracterización microestructural se llevó a cabo utilizando microscopía electrónica de emisión de campo Dual Beam (FIB-FESEM), un equipo de alta resolución que permite analizar tanto la morfología superficial como la adherencia entre matriz y fibra. Se realizaron análisis antes y después de los ensayos, con parámetros específicos de apertura, distancia de trabajo y voltaje de aceleración para optimizar la obtención de imágenes del biocompuesto. Asimismo, se aplicó un recubrimiento de oro a las probetas debido a la naturaleza no conductiva del material, lo que evitó acumulación de carga en las imágenes SEM.

Las imágenes obtenidas antes del ensayo revelaron una microestructura compacta, homogénea y bien adherida, con fibras de fique completamente embebidas en la matriz epoxi y una baja porosidad. El análisis mediante espectros EDS confirmó una distribución uniforme de los elementos constituyentes, lo que refleja una fabricación eficiente.

Tras el ensayo de cavitación con erosión, las imágenes SEM mostraron una pérdida significativa de material en la matriz, con la aparición de cráteres, zonas erosionadas y exposición parcial o total de las fibras, lo que evidencia

el daño provocado por el colapso de burbujas de vapor y la acción abrasiva de las partículas sólidas. El análisis EDS posterior mostró una disminución de la intensidad de los elementos característicos de la resina, indicando desgaste y pérdida de material. También se identificaron residuos adheridos a la superficie; lo cual, demuestra la interacción del medio de ensayo con el material. Los resultados permiten concluir que, aunque la fibra de fique muestra una resistencia inicial aceptable, la matriz epóxica es particularmente vulnerable a fenómenos de cavitación y erosión. La interfaz fibra-matriz también presentó debilitamiento bajo condiciones dinámicas extremas, observándose desprendimiento de fibras en ciertas regiones.

Estos hallazgos resaltan la necesidad de mejorar la formulación del biocompuesto o aplicar tratamientos superficiales que incrementen su resistencia al desgaste hidrodinámico, especialmente si se pretende utilizar en aplicaciones hidráulicas como turbinas de vórtice gravitacional. Sin embargo, los resultados también destacan el potencial de las fibras naturales como el fique, reforzando la idea de que es posible desarrollar materiales más sostenibles y eficientes para entornos exigentes.

Finalmente, este estudio contribuye significativamente al conocimiento del comportamiento microestructural de biocompuestos bajo condiciones de desgaste extremo y promueve nuevas líneas de investigación en el uso de fibras naturales en componentes sometidos a fenómenos de cavitación y erosión, sectores donde aún no se ha explorado ampliamente su aplicación.

Highlights:

1. Biocompuesto de fique mostró buena adherencia inicial matriz-fibra.
2. Cavitación y erosión generaron daños significativos en la matriz.
3. Análisis FIB-FESEM reveló cráteres y desprendimiento de fibras.
4. El biocompuesto tiene potencial para turbinas más sostenibles.

Resumen gráfico:

La **Figura 1** obtenida mediante FIB-SEM, revela la intrincada estructura interna de un material compuesto por fibras naturales de fique y una resina epoxi. Las fibras de fique, de color más claro, se encuentran inmersas en una matriz de resina epoxi de tono más oscuro. Esta combinación de materiales ofrece una alternativa sostenible y con excelentes propiedades mecánicas para diversas aplicaciones industriales.

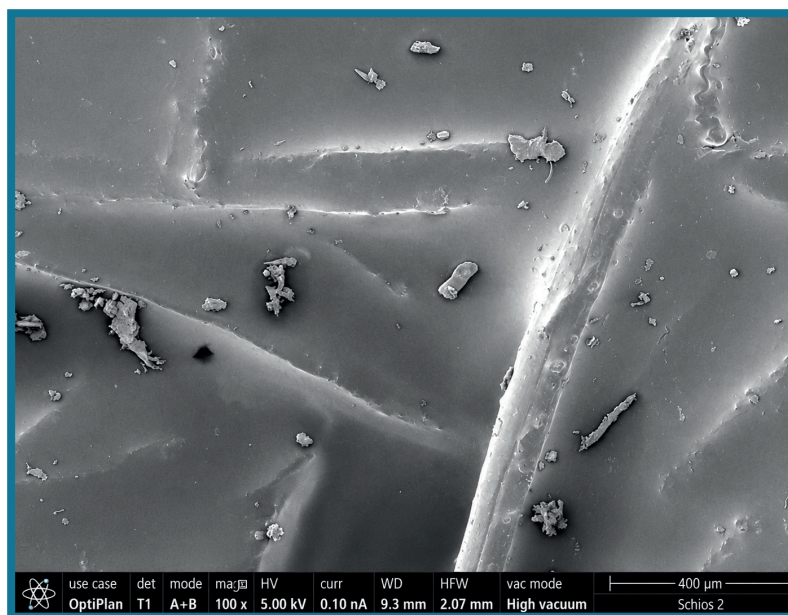


Figura 1 Compuesto de fibra de fique y resina epóxica antes del ensayo.

La **Figura 2** tomada con el detector T1 de un biocompuesto de fibra de fique y resina epoxi tras el ensayo de corrosión con cavitación. La imagen muestra una evidente pérdida de material en la matriz, con la formación de cráteres y zonas erosionadas debido al colapso de burbujas de vapor y la acción erosiva del medio. Se observa exposición y desprendimiento parcial de las fibras, indicando daños significativos en la interfaz fibra-matriz y confirmando la susceptibilidad del material a estos fenómenos combinados.

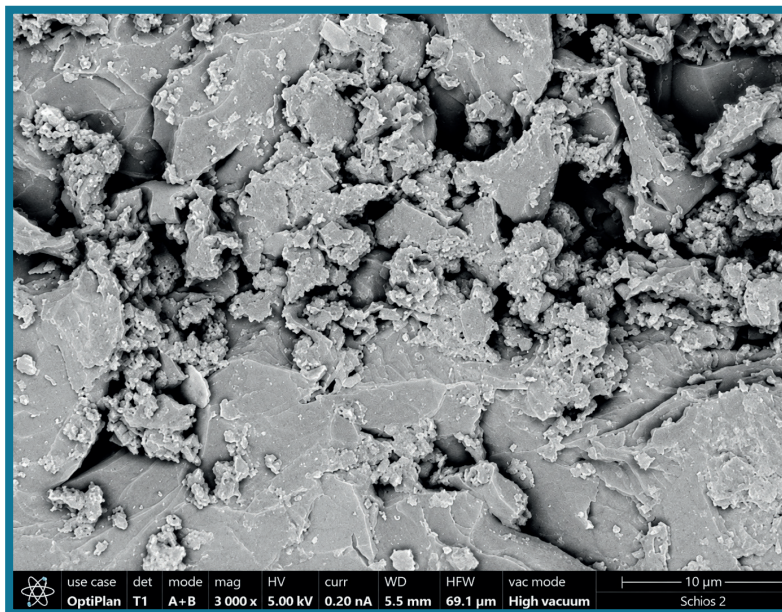


Figura 2 Compuesto de fibra de fique y resina epóxica después del ensayo.

10

Methodologies for the generation of Grover oracles: a comparative analysis

Miguel Ángel Naranjo Cano,
Luis Alejandro Fletscher Bocanegra

GITA

Grupo de investigación en Telecomunicaciones Aplicadas (GITA)
Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Searching for information in computer systems has long been one of the most important challenges in computing. As the amount of data stored digitally continues to grow, retrieving specific information efficiently becomes increasingly complex. Over the years, numerous classical algorithms have been developed to perform searches under various conditions. These algorithms vary depending on the type of data, the number of possible solutions, and the way the search term is defined. Due to this variety, specialized algorithms have been developed to cater to specific tasks, such as searching through databases, analyzing patterns, or identifying items in large datasets.

The emergence of quantum computing has introduced new possibilities for addressing this long-standing problem. Quantum computers use principles of superposition and entanglement to process information in ways that are fundamentally different from classical machines. One of the most significant advances in this area is Grover's algorithm, a quantum search algorithm that can find a specific item in an unsorted list theoretically faster than any traditional method used classically. In theory, it provides a quadratic speedup, which means it can perform a search with far fewer steps as the amount of data increases. This advantage has made Grover's algorithm an important focus of research; this is why multiple advancements have been made in the area of optimization, applying it to new field types and making it more accessible to the industry. This progress has been made to adapt and optimize it for real applications.

Despite its potential, Grover's algorithm faces practical challenges. One of its main limitations is the need for an oracle function, a special component that identifies whether a given state represents the correct answer. This oracle must be built specifically for each type of problem or dataset, making the process complex and time-consuming. Designing this function requires deep knowledge of both the data structure and quantum circuit design, and it often represents the most resource-intensive part of implementing the algorithm. Research has been carried out to propose several methods to make the generation of quantum circuits more automatic. However, these methods often use different performance measures, such as circuit depth, number of quantum gates, or accuracy, which makes it difficult to compare their effectiveness directly. Establishing common evaluation criteria is therefore essential for understanding which approaches work best and for advancing quantum algorithm development in a consistent way.

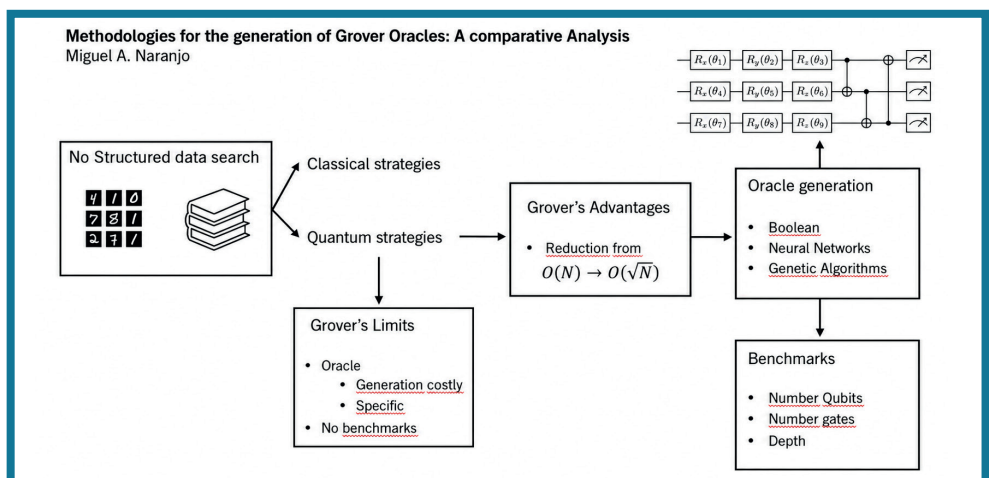
This presentation compares three major approaches for generating quantum circuits that can serve as oracles: Boolean functions, neural networks, and genetic algorithms. The Boolean approach focuses on translating logical rules directly into quantum operations, offering a clear structure but limited flexibility for complex data. Neural network approaches use machine learning to learn patterns from examples or expected output data, allowing them to adapt more easily to varied problems. Genetic algorithms, on the other hand, use ideas from natural evolution, such as selection and mutation, to evolve efficient circuit designs over multiple iterations.

The comparison of these methodologies is based on unified metrics, allowing a fair assessment of their complexity, resource requirements, and scalability. The goal is to better understand how each approach performs under similar conditions and what advantages they offer for automating quantum circuit generation. This work contributes to making quantum search algorithms more practical and accessible for future applications.

Highlights:

1. Quantum computing offers faster solutions for complex data searches.
2. Grover's algorithm speeds up searches but needs a custom oracle circuit.
3. Oracle generation remains a major challenge in quantum computing.
4. Boolean, neural, and genetic methods are compared for circuit automation.

Resumen gráfico:



11

Estrategias basadas en la naturaleza y las comunidades orientadas al manejo de la escorrentía superficial en la ladera nororiental de Medellín

Miguel Angel Castaño Benitez,
Paola Andrea Arias Gómez,
Lina María Berrouët Cadavid

GIGA

Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

En las áreas urbanas de América Latina y el Caribe, los impactos del cambio climático se ven amplificados por condiciones estructurales de desigualdad, una gestión territorial que prioriza dinámicas de mercado sobre la protección socioecológica y una concentración de más del 80% de la población. Esto ejerce una presión adicional sobre los ecosistemas y la infraestructura urbana, agravándose por los procesos de migración interna y externa, que son impulsados por conflictos sociales y políticos. Factores como el déficit de vivienda, desempleo, pobreza, altos costos del suelo urbano, normativas urbanísticas rígidas y una limitada presencia del Estado, dan lugar a procesos de construcción, urbanización e intervenciones informales y no planificadas, especialmente en zonas periféricas o periurbanas de las ciudades, que se caracterizan por su alta exposición a riesgos de desastres, su solapamiento con áreas de protección ambiental, la exclusión del perímetro de acceso a servicios públicos, poca presencia gubernamental, actividades ilegales, fenómenos de violencia y la influencia de grupos al margen de la ley. Este es el caso de la ladera nororiental (Comuna 1, 3 y 8) de Medellín, donde este fenómeno ha generado procesos de deforestación, compactación e impermeabilización del suelo, intensificando problemas de escorrentía superficial, detonante de inundaciones y deslizamientos, especialmente en estas áreas en contextos de altas vulnerabilidades socioeconómicas y biofísicas.

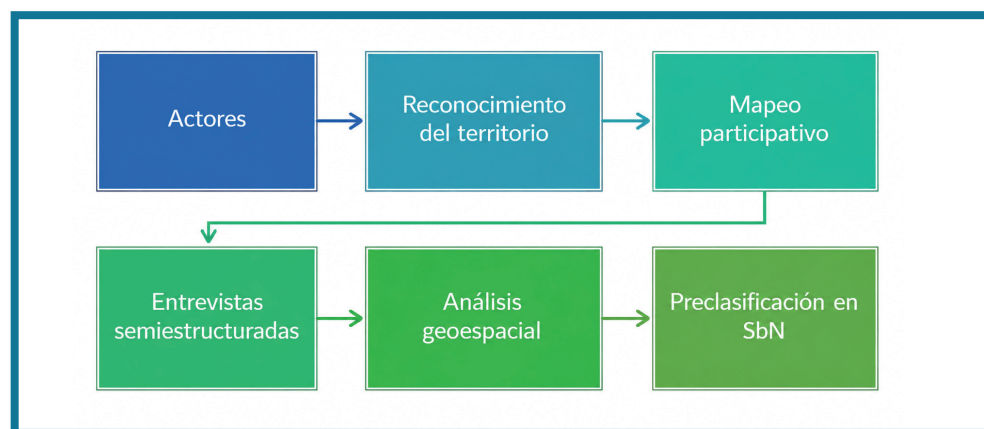
Ante estos retos, la búsqueda de estrategias de adaptación que sean efectivas y socialmente justas es un desafío central. Entre esas alternativas, las Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) se presentan como estrategias para afrontar estas problemáticas, ya que son medidas que, bajo un enfoque socioecológico, fomentan la funcionalidad ecológica a través de procesos naturales, ofreciendo beneficios a la biodiversidad y haciendo frente a los desafíos sociales. Sin embargo, su planeación, diseño e implementación, considerando, a su vez, la perspectiva comunitaria en contextos urbanos latinoamericanos, es escasa, siguiendo un modelo de gobernanza de arriba hacia abajo. A menudo, cuando se implementan, los actores académicos o gubernamentales, se introducen SbN diseñadas en contextos económicos, sociales, políticos y ambientales diferentes, lo que genera limitaciones como la falta de alineación con las necesidades locales, plazos y objetivos incongruentes que no coinciden con los ritmos de las comunidades, tecnologías de altos costos, poca replicabilidad y mantenimiento, baja incorporación de los conocimientos locales y limitación de la participación a niveles informativos o de consulta, sin promover un involucramiento profundo de las comunidades.

Por lo tanto, este trabajo busca caracterizar estrategias basadas en la naturaleza y las comunidades orientadas al manejo de la escorrentía superficial, actualmente existentes en la ladera nororiental de Medellín, como medidas de adaptación al cambio climático. Desde una perspectiva técnica, y considerando procesos participativos, se caracterizaron las estrategias a través de entrevistas semiestructuradas y recorridos en campo, lo que permitió recoger las perspectivas desde los conocimientos, cotidianidades y realidades de las comunidades. Así, se generó un inventario en el que se describe cada estrategia y mediante análisis geoespaciales se evaluó su relación de con lineamientos de ordenamiento ambiental y territorial, como usos del suelo, conectividad ecológica, retiros de quebradas, condiciones de riesgo y amenazas, espacios públicos, entre otros. Asimismo, se consideraron características de gestión y gobernanza, como actores involucrados, origen, tiempo de implementación, niveles de participación, modelo de gobernanza, actividades de seguimiento y mantenimiento, pre-clasificando las estrategias según categorías existentes de SbN. Posteriormente, se realizarán análisis transdisciplinarios que permita determinar en qué medida dichas estrategias cumplen con los criterios del Estándar Global de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) para SbN, culminando con la identificación de indicadores que permitan evaluar y hacerle seguimiento las SbN desde un enfoque comunitario.

Highlights:

1. Las estrategias identificadas se sobreponen sobre la red de conectividad ecológica.
2. La autogobernanza predomina en las estrategias caracterizadas.
3. El 90% de las estrategias integran algún tipo de cultivo alimenticio.

Resumen gráfico:



12

Análisis de la variabilidad espacio-temporal de la fracción carbonácea del material particulado (PM) en las principales ciudades de Colombia y su relación con parámetros socio-ambientales

.....

Santiago Andrés Franco Carvajal,
Mauricio Andrés Correa Ochoa

GLIMA

Grupo de Investigación y Laboratorio de Monitoreo Ambiental (GLIMA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

El material particulado (PM) es un contaminante atmosférico con importantes implicaciones negativas en términos de salud y ambiente. Este contaminante, también conocido como aerosol atmosférico tiene la capacidad de permanecer suspendido y transportarse por largas distancias en la atmósfera (Kastury et al., 2018). Proviene de fuentes de emisión antropogénicas y naturales (Badyda et al., 2016). Inicialmente el estudio a nivel global del contaminante estuvo particularmente enfocado en su tamaño, considerando especialmente partículas de diámetro menor a 10 y 2.5μ (PM10 y PM2.5, respectivamente), en tiempos más recientes, el enfoque ha estado sobre la composición del contaminante, la cual está ligada a sus fuente de emisión y su origen (primario o secundario), lo que resulta en una mezcla heterogénea de diversos compuestos, entre los cuales se hallan principalmente especies carbonáceas — Black Carbon (BC), Brown Carbon (BrC), Carbono Orgánico (OC) y Carbono Elemental (EC) —, metales, iones, minerales, material biológico, entre otros (Correa et al., 2023). La mayor parte del PM la componen las especies carbonáceas, ocupando desde el 20% de la masa hasta más del 70% (Singh & Srivastava, 2021, Gonçalves et al., 2011).

A nivel global se han realizado estudios que han empleado el uso sistemas de información geográfica (SIG), estadística, variables ambientales y demográficas para comprender las dinámicas de la fracción carbonácea del PM. En Estados Unidos, Awad et al. (2017) emplearon modelos de regresión para analizar la relación entre las concentraciones de BC y factores como tipo de carretera, uso de suelo, topografía, densidad poblacional; encontrando variaciones temporales en los niveles del contaminante entre días laborales y fines de semana. En India, Sánchez et al. (2018) emplearon imágenes Landsat, OpenStreetMap, y encuestas comunitarias para analizar las concentraciones de PM2.5 y BC en zonas periurbanas, identificando una alta heterogeneidad espacial del BC vinculada al tráfico y a la industria. En Canadá, Healy et al. (2019) evaluaron el impacto de incendios forestales sobre el BC y PM2.5 a partir de imágenes satelitales MODIS y el modelo HYSPLIT, estableciendo correlaciones directas entre las plumas de humo y aumentos en concentraciones urbanas de los contaminantes. En China, Bai et al. (2020) realizaron análisis espaciales de PM10, PM2.5, OC y EC, integrando datos ambientales (viento, lluvia) y sociales (número de vehículos, densidad poblacional).

Es posible encontrar numerosos estudios que emplean como herramientas la estadística, los modelos matemáticos-estadísticos y los SIG para comprender el comportamiento de los compuestos carbonáceos del PM. Sin

embargo, actualmente no se encuentra mucha información disponible acerca de la composición carbonácea del PM en las principales ciudades de Colombia, lo que resalta la necesidad de una caracterización precisa para comprender sus efectos, origen y distribución, parámetros clave para diseñar estrategias efectivas de mitigación y políticas públicas orientadas a mejorar la calidad del aire en el país. A nivel nacional, los datos son limitados y fragmentados, lo que dificulta la comprensión de las dinámicas regionales de contaminación. La falta de información detallada sobre la fracción carbonácea del PM no solo limita la capacidad para mitigar sus efectos sobre la salud y el clima, sino que también impide la formulación de políticas públicas basadas en evidencia científica.

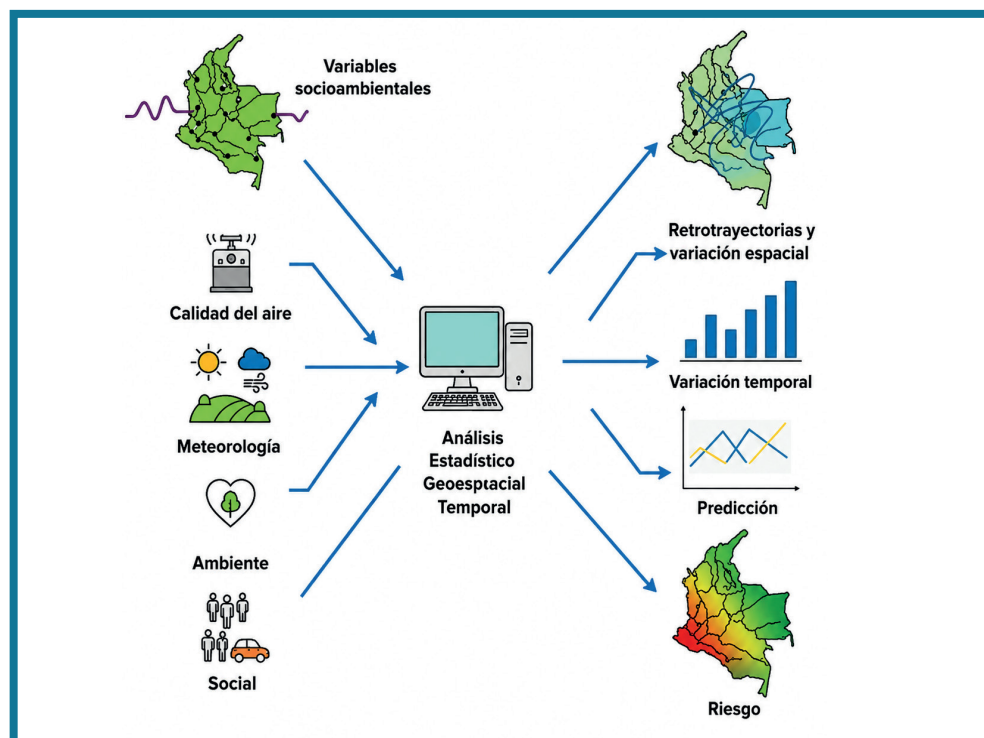
En las principales ciudades de Colombia las redes de monitoreo de la calidad del aire realizan mediciones constantes sobre la fracción carbonácea del PM, sin embargo, el conocimiento de los efectos ambientales, sanitarios y climáticos es escaso y se encuentran pocos estudios que hayan estudiado particularmente los compuestos de la fracción carbonácea. Por lo anterior, se hace evidente la necesidad de comprender las dinámicas de estos compuestos y como las características climáticas, ambientales y sociales se relacionan con dichas dinámicas.

La metodología del presente trabajo está dividida en dos etapas. La primera consiste en la consecución de los datos de calidad del aire y socio-ambientales. Los datos de calidad del aire se obtienen a partir de búsqueda bibliográfica y solicitud de datos oficiales a las entidades ambientales en las cuales se realizan las mediciones pertinentes: Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá — SIATA en Medellín; Secretaría Distrital de Ambiente — SDA en Bogotá; y Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca — CVC en Cali. Los datos socio-ambientales consideran variables meteorológicas (Bases de datos internacionales, IDEAM, entre otros), geoespaciales (IDEAM, IGAC, imágenes satelitales, entre otros), ambientales (uso del suelo, puntos calientes), poblaciones (DANE, Autoridades ambientales, POT, entre otros). En la segunda etapa, los datos obtenidos en la etapa anterior son analizados con el fin de obtener insumos que permitan tener una visión holística del comportamiento de estos contaminantes, como: análisis de variación espacial y temporal, retro trayectorias, modelos de predicción y de riesgo. El uso de herramientas geoinformáticas y modelos matemáticos y estadísticos son fundamentales para garantizar la calidad de los resultados. En este trabajo se pretenden identificar como las particularidades de las ciudades principales de Colombia se ven afectadas por el contaminante y dar lugar a comparaciones entre las mismas.

Highlights:

1. La mayor parte de la composición del material particulado está dada por su fracción carbonácea (Black Carbon, Brown Carbon, Carbono Elemental y Carbono Orgánico).
2. En las principales ciudades de Colombia se tienen redes de calidad del aire que estiman la concentración de los compuestos de la fracción carbonácea del PM, sin embargo, no se han realizado estudios que permitan relacionar las características socio-ambientales de las ciudades con las dinámicas de los contaminantes.
3. Entender las dinámicas de la fracción carbonácea del PM desde una visión holística (contemplando su formación, variación temporal y espacial, riesgos asociados e incluso modelos de predicción) se constituye en una herramienta útil para identificar y mitigar sus efectos sobre la salud y el ambiente y el desarrollo de políticas públicas basadas en evidencia científica.

Resumen gráfico:



13

Oxidación de limoneno con catalizadores obtenidos a partir de materiales carbonosos de cáscara de naranja

Amiris Perea Cuesta,
Aída Luz Villa Holguín

Catálisis Ambiental

Grupo de investigación Catálisis Ambiental

Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Los cítricos son uno de los frutos más comercializados alrededor del mundo, debido a sus beneficios para la salud. Por esta alta demanda, millones de toneladas de residuos de cáscaras cítricas son generadas anualmente. Según la FAO en 2019 se produjo 149 millones de cítricos, de los cuales entre 50- 60% terminaron como residuos. Convencionalmente la disposición final de estos residuos se realiza por medio de incineración y compostaje, lo que representa un reto, ya que se pueden generar dificultades en el almacenamiento de grandes volúmenes de residuos, mala calidad del aire y acidez alta. Estos residuos son de gran interés debido a que contienen varios compuestos fitoquímicos como aceite esencial, fibra dietética, polifenoles, pectina y lignina, compuestos que se pueden transformar en productos intermedios de interés comercial para industrias como la farmacéutica, química, cosmética y de alimentos. Dentro de estos productos destacan los aceites esenciales y los materiales carbonosos como el carbón activado. El principal componente de los aceites esenciales de la cáscara de naranja es el limoneno, este es un monoterpreno que se utiliza como agente aromatizante en perfumes, productos corporales y de limpieza; adicionalmente, puede transformarse en productos de valor agregado como alcohol perílico, carveol, carvona, 1,2-epóxido de limoneno y dihidrocarvona, compuestos que son útiles en la industria farmacéutica por su actividad contra enfermedades como el cáncer de piel, colon, pulmón, páncreas y mama; por ejemplo, la dihidrocarvona es un producto potencial como agente terapéutico y para la síntesis de biopolímeros. Adicionalmente, las cáscaras de cítricos se pueden transformar en carbón activado, material con gran porosidad que tienen aplicación en el almacenamiento de energía, en la industria cosmética, farmacéutica, en remediación de aguas residuales y como soporte de catalizadores.

En este trabajo se utilizaron cáscaras de naranja de dos municipios antioqueños (Jericó y Yolombó), como fuente de aceite esencial y para la obtención de carbón activado que fue posteriormente para sintetizar catalizadores. Inicialmente el material se clasificó de acuerdo con el grado de madurez como CN2 (verde), CN3 (madurez intermedia) y CN6 (madura), según la norma NTC 4086. Estos carbones se prepararon por activación química con ZnCl_2 y KOH, variando la relación biomasa: agente activante (1:0.5, 1:2); los sólidos preparados con la cáscara CN6 nombrados como C- ZnCl_2 (0.5), C- ZnCl_2 (2), C-KOH(0.5), C-KOH(2), se trataron con solución acuosa de $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ con 10 mL de H_2SO_4 (2 M), obteniéndose FeC- ZnCl_2 (0.5), FeC- ZnCl_2 (2), FeC-KOH(0.5) e FeC-KOH(2). El aceite esencial extraído de todas las cáscaras por destilación con

arrastre con vapor (94 °C, 2 h) y los productos de reacción se analizaron por GC y GC/MS respectivamente. Los catalizadores se caracterizaron mediante BET de un punto, FTIR, TPD-NH₃ y FTIR-Py.

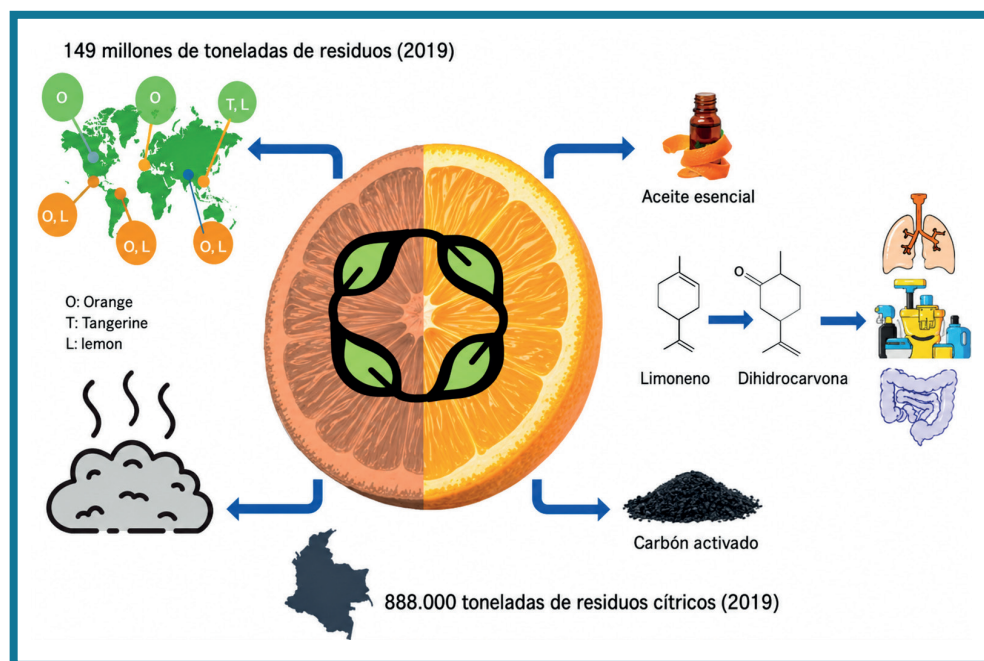
En el aceite esencial se identificó la presencia de limoneno (96%) y en menor concentración α -pinene (0.7%), β -mircene (0.6%) y α -felandreno (2.7%). El análisis BET mostró un aumento en el área superficial de los carbones activados preparados con una mayor relación de agente activante. La mayor área BET (896 m²/g) se obtuvo con el material CN6-Zn(2), la cual aumentó (1063 m²/g) después de impregnar el material con Fe. Los análisis FTIR mostraron la presencia de bandas a 3322 cm⁻¹ y 1100 cm⁻¹ relacionadas con la vibración de estiramiento de hidroxilos en grupos fenólicos y en carbonos alifáticos; también se observó la presencia de bandas en el rango de 1645-1734 cm⁻¹, relacionadas con la vibración de estiramiento de C=O de grupos carbonilo y grupos carboxilo. La presencia de estos grupos funcionales ácidos o compuestos oxigenados pueden proporcionar acidez al material y facilitar el anclaje de las fases activas. Mediante análisis FTIR-Py y TPD-NH₃ se identificó la presencia de acidez tipo Lewis en el catalizador FeCN6-ZnCl₂(2) de fuerza baja (77 μ mol/g) y media (25 μ mol/g). En la oxidación de limoneno (70 °C, 750 rpm, metanol, TBHP y decano), se obtuvo una conversión de limoneno a 3 h de 28% y de 56% a 24 h; la selectividad a p-cimeno, alcohol perílico y diol se mantuvo constante en 3%, la selectividad a dihidrocarvona aumentó de 36 a 53%, cetona con potencial para la síntesis de biopolímeros y agente terapéutico.

A futuro se espera sintetizar carbón activado y catalizadores con cáscaras de mandarina y realizar variaciones en las condiciones de síntesis (acidez, temperatura de calcinación, carga de fase metálica, tipo de fase metálica) y condiciones de reacción (temperatura, solvente, tiempo, tipo y cantidad de oxidante) para evaluar su efecto en la distribución de productos de reacción. Adicionalmente, se realizarán a los catalizadores caracterizaciones fisicoquímicas, como SEM, XPS, DRX, TGA, análisis de grupos funcionales por el método de Boehm y análisis proximal.

Highlights:

1. La presencia de Zn e Fe favorecieron la oxidación de limoneno hacia dihidrocarvona.
2. Los materiales presentan una mayor área superficial con ZnCl₂ que con KOH.
3. La activación e impregnación de metales aumentan el área y la acidez del carbón activado.

Resumen gráfico:



14

Codigestión anaerobia de efluentes de extracción de palma de aceite y cáscaras de plátano en la región del Urabá antioqueño

Jane Estacy Herrera Mendoza,
Juan Esteban Vásquez Bustamante,
Ainhoa Rubio Clemente

Bioprocesos

Grupo de Investigación Bioprocesos

Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Este estudio aborda la problemática de la acumulación de residuos generados por efluentes de la extracción de aceite de palma y residuos sólidos de cáscaras de plátano en la región de Urabá, se propone a la codigestión anaerobia como una solución innovadora que integra la gestión ambiental con la producción energética. La agricultura moderna, pilar económico de la zona, genera grandes volúmenes de subproductos de la palma de aceite y el plátano que, al ser manejados de forma inadecuada, contaminan los suelos y cuerpos de agua, lo que amenaza la salud de los ecosistemas (Mcennan & Group, 2022; Triviño et al., 2020). La acumulación de estos desechos no solo representa una carga ambiental, sino también un desaprovechamiento de recursos bioenergéticos (Zhang et al., 2020).

Magnitud y Especificidad del Problema en Urabá

La magnitud de la problemática se concentra en dos flujos de residuos específicos. Primero, el Efluente de la Extracción de Palma Aceitera (POME), del cual la planta Bioplanta Palmera en Chigorodó reportó una producción de 54,872 m³ en solo nueve meses, representando un riesgo significativo para la vida acuática debido a su alta carga contaminante (Vijayan et al., 2024). Segundo, los residuos sólidos de cáscaras de plátano, donde la empresa C.I. Unibán genera aproximadamente 41.54 toneladas semanales. Actualmente, esta biomasa es desechada, lo que subraya la necesidad de una estrategia de valorización (C.I. Unibán, 2023).

La Solución: Codigestión y Economía Circular

El proyecto propone la codigestión anaerobia de POME y cáscara de plátano como una estrategia viable para la generación de biogás, alineada con los principios de la economía circular. La viabilidad técnica se fundamenta en la complementariedad de los sustratos: el POME es rico en lípidos y materia orgánica (Suksaroj et al., 2023), mientras que la cáscara de plátano aporta hidratos de carbono estructurales como celulosa y hemicelulosa (Olsson & Hahn, 1996). La combinación de ambos busca una sinergia que optimice el balance de nutrientes, mitigue la inestabilidad de la digestión mono-sustrato y, por ende, incremente sustancialmente la eficiencia en la producción de metano. Este enfoque transforma un pasivo ambiental en un doble activo: energía renovable (biogás) y fertilizante orgánico (digestato), contribuyendo a la autosostenibilidad energética regional.

Metodología y Enfoque Experimental

La investigación se centra en evaluar la producción de biogás mediante una metodología experimental que abarca tres fases clave:

Caracterización de Sustratos: Se realizará la caracterización fisicoquímica (pH, DQO, ST, SV, Alcalinidad) y el Potencial Bioquímico de Metano (PBM) de ambos sustratos. La medición de la relación Alcalinidad Parcial/Alcalinidad Total (AP/AT) es crucial para garantizar la estabilidad del proceso y la capacidad de amortiguación del sistema, evitando la inhibición por acidificación (Luque et al., 2013).

Evaluación de la producción de Biogás en Reactor ASBR: Se implementará un diseño experimental con cinco mezclas distintas de codigestión en reactores tipo ASBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor) de 5 litros de volumen de trabajo, inoculados con lodos municipales.

Las proporciones para probar serán: 100% POME, 75% POME y 25% cáscara, 50% de cada sustrato, 25% POME y 75% cáscara, y 100% cáscara. Los reactores tendrán un volumen de trabajo de 5 litros, operando con una carga orgánica de 1 g de SV/L/día y un tiempo de retención de 20 días. El monitoreo será constante, midiendo semanalmente Ácidos Grasos Volátiles (AGV) por HPLC, y midiendo el biogás colectado cada dos días para analizar su contenido de metano CH_4 con un analizador de gases. El análisis estadístico determinará las sinergias o inhibiciones generadas por la mezcla. La elección del ASBR se justifica por su capacidad para manejar altas cargas orgánicas, basado en la experiencia previa del grupo de investigación en Antioquia Bioprocesos, donde se lograron productividades de hasta 1000 mL CH_4 /L.d y su operabilidad en régimen discontinuo, lo cual es beneficioso para sustratos variables.

Viabilidad Técnico-Económica: Finalmente, se calcularán indicadores financieros clave como el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para determinar la rentabilidad y la factibilidad de escalar el proceso de codigestión a nivel industrial en Urabá.

Conclusión y Contribución

Este proyecto puede ofrecer una alternativa para la mitigación de impactos ambientales causados por las mayores Agroindustrias en Urabá, a la vez que consolida una estrategia que fortalece un modelo de economía circular, y diversifica las fuentes de biomasa disponibles. Los resultados permitirán establecer las condiciones óptimas para transformar un pasivo ambiental en un activo económico y energético, proporcionando soluciones sostenibles a los desafíos ambientales, energéticos y económicos de la región. Además, este enfoque apoya activamente la lucha contra el cambio climático y la descarbonización.

La implementación de la codigestión anaerobia contribuye a la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI). Al aprovechar el metano (CH_4) liberado por la descomposición incontrolada de los residuos orgánicos y convertirlo en biogás para uso energético, el proyecto logra una doble acción: evita la emisión de CH_4 a la atmósfera y, simultáneamente, genera una fuente de energía renovable.

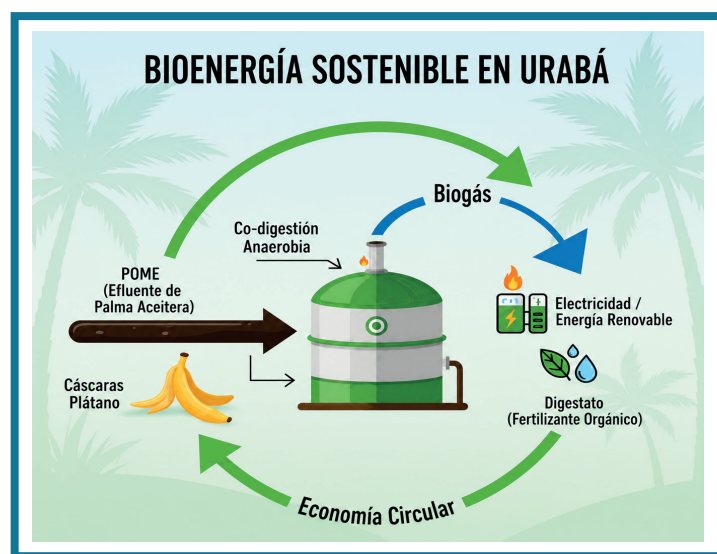
De esta manera, la investigación contribuye a la protección del medio ambiente y a la generación de energía limpia, reforzando la posición de Urabá hacia un futuro más sostenible y con bajas emisiones de carbono.

Palabras Claves: Biogás, POME, Digestión Anaerobia, Cáscaras de Plátano, Economía Circular, Cambio Climático.

Highlights:

1. Codigestión de POME y cáscaras de plátano para generar biogás.
2. Aprovechamiento energético de residuos agroindustriales en la Región de Urabá.
3. Evaluación de producción energética renovable en digestores ASBR.
4. Gestión sostenible de residuos y generación de biogás.

Resumen gráfico:



15

Diseño e implementación de pilotos de captación de aguas lluvias en viviendas: una contribución para gestionar el riesgo de desastres y generar adaptación al cambio climático en viviendas de ladera en Medellín

Robinson Velásquez Cartagena,
Juan Camilo Villegas Palacio,
John Dairo Zapata Ochoa

Ecología Aplicada

Grupo de Investigación Ecología Aplicada

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Las amenazas relacionadas con las precipitaciones torrenciales en zonas urbanizadas del trópico incluyen, entre otros, el potencial aumento de la escorrentía superficial y la generación de caudales pico elevados. Este es el caso de la ciudad de Medellín, donde, además, hay comunidades en zonas de ladera que viven en condición de vulnerabilidad alta, lo que aumenta el riesgo asociado a este tipo de eventos de lluvia. Globalmente se han propuesto alternativas de mitigación a partir de la captación de aguas lluvias. Sin embargo, su implementación generalmente requiere grandes áreas y volúmenes, lo que genera dificultades de implementación dada la alta densidad urbana y el alto costo de la construcción de estos sistemas en zonas densamente urbanizadas. Dado lo anterior, para las zonas de ladera de Medellín una alternativa puede ser la captación centralizada de agua lluvia de almacenamientos individuales (en la escala de vivienda), que permiten el uso doméstico del agua captada.

Este trabajo tiene por objetivo presentar la apropiación comunitaria del conocimiento técnico relacionado con la captación de aguas lluvias como medida de gestión de riesgo de desastres y adaptación al cambio climático en la comuna 8, Medellín. Para esto, se realizó una caracterización del uso de agua lluvia en una subcuenca de la Aguadita, la cual permite observar que una proporción alta de habitantes estarían dispuestos a usar el agua lluvia si lo ven necesario. Sin embargo, la mayoría de encuestados perciben que el mayor beneficio de captar agua lluvia es económico (disminución del valor de la cuenta de servicios públicos) en vez de la disminución de la incidencia de desastres o la adaptación al cambio climático.

Adicionalmente, se implementaron prototipos demostrativos de captación de agua lluvia a escala de vivienda. Estos sistemas, de bajo costo y de volumen reducido, permiten almacenar hasta 10 mm de lluvia (correspondientes a 400 litros de almacenamiento en 40 m²). En la instalación de estos prototipos se sistematizó la captación y el uso mediante sensores que registraron las entradas, almacenamientos y salidas de agua en cada uno de ellos.

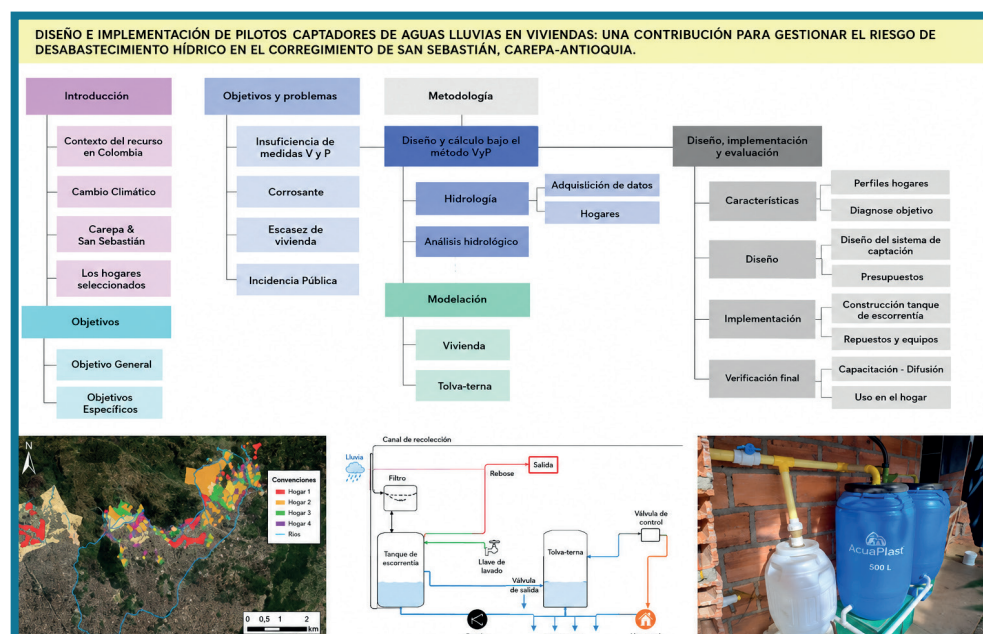
Esta investigación también propició la creación de la primera escuela de Vivienda Adaptada al Cambio Climático, específicamente en el componente de aguas lluvias, al interior de la Mesa de Vivienda y Hábitat de la Comuna 8, una organización comunitaria en defensa de la vivienda digna y con enfoque en la gestión del riesgo y de la adaptación al cambio climático. Igualmente, este trabajo facilitó dar sustento técnico a las medidas 1 "Manejo de aguas lluvias y de escorrentías" y 4 "Recolección de aguas en las casas" de las Ocho

por la 8, en el Acuerdo Local 008 de 2023, el cual adopta estrategias de acción climática incluyente para la reducción del riesgo y la adaptación al cambio climático para la Comuna 8 – Villahermosa. Como un caso de estudio, es resultado de la participación y el acumulado histórico en la Convivencia Segura con el Riesgo, encaminada al Mejoramiento Integral de Barrios (MIB) y como ejercicio político, de participación, comunicación y tecnificación en la Gestión del Riesgo de Desastres y la Acción Climática en barrios populares.

Highlights:

1. La sistematización del uso aporta datos contextuales para el balance hídrico.
2. La captación de lluvia a bajas escalas puede generar apropiación social.
3. La captación de lluvias con otros sistemas ayuda a mitigar el riesgo de desastres.
4. Los prototipos aplicados en los barrios populares, genera adaptación al cambio.

Resumen gráfico:



16

Mitigación del drenaje ácido de minas en un patio de almacenamiento de carbón

Yeny Carolina Rojas Díaz,
Ainhoa Rubio Clemente,
Edwin Lenin Chica Arrieta

GEA

Grupo de Energía Alternativa (GEA)

Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Los recursos hídricos: los drenajes ácidos de mina (DAM). Estos efluentes se originan por la oxidación de minerales sulfurados en presencia de agua y oxígeno, lo que produce soluciones con pH bajo y altas concentraciones de metales pesados y sulfatos (Jiao et al., 2023; Azizi et al., 2024). Su disposición inadecuada afecta gravemente los ecosistemas acuáticos y terrestres, generando impactos como la acidificación del suelo, la pérdida de biodiversidad y la contaminación del recurso hídrico (Skousen et al., 2019; Sharma et al., 2020).

En Colombia, la gestión de los DAM representa un desafío ambiental complejo debido a la diversidad climática y geográfica. En regiones como Norte de Santander, las condiciones tropicales y los periodos alternos de lluvia y sequía favorecen la generación de efluentes altamente ácidos con concentraciones significativas de hierro (Fe) y sulfatos (SO_4^{2-}) (Sharma et al., 2020; Vasquez et al., 2022). La empresa objeto de estudio, ubicada en el municipio de San Cayetano, enfrenta actualmente requerimientos de la autoridad ambiental por incumplimiento de la normativa de vertimientos (Resolución 631 de 2015), lo cual motiva el desarrollo de esta investigación.

El objetivo principal del estudio es establecer un tren de tratamiento eficiente para la disposición de los DAM generados en un patio de acopio de carbón, considerando sus características fisicoquímicas y la normatividad vigente. La metodología incluye la caracterización fisicoquímica del efluente analizando parámetros como pH, conductividad, hierro y sulfatos, siguiendo los procedimientos establecidos por Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (Lipps et al., 2023). Los muestreos se realizarán tanto en época seca como en época lluviosa, de acuerdo con la NTC-ISO 5667, con el fin de capturar la variabilidad climática y su influencia sobre la composición del DAM.

En cuanto a las estrategias de tratamiento, se analizarán métodos activos (como neutralización, precipitación química, adsorción y separación por membranas) y métodos pasivos (Xia et al., 2023; Baloyi et al., 2023). En la búsqueda de soluciones sostenibles, la literatura científica destaca los procesos avanzados de oxidación (AOPs) como tecnologías promisorias para eliminar metales y reducir la acidez del agua. Chitransh et al. (2024) demostraron la eficacia del uso combinado de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y bicarbonato de potasio (KHCO_3) en la neutralización de DAM, mientras que Chen et al. (2021) reportaron la recuperación de recursos valiosos como metales y ácido sulfúrico mediante técnicas electroquímicas y de membranas.

La metodología propuesta en esta investigación contempla seis etapas principales: (1) revisión bibliográfica; (2) caracterización fisicoquímica de los DAM; (3) evaluación de impactos ambientales mediante la matriz de Conesa (2009); (4) identificación y comparación de alternativas de tratamiento; (5) simulación de procesos en MATLAB; y (6) formulación del tren de tratamiento y análisis de eficiencia. Los resultados serán analizados mediante herramientas estadísticas.

A partir de la información obtenida, se seleccionarán las alternativas tecnológicas más adecuadas, considerando su eficacia, viabilidad técnica y costo. Entre las estrategias potenciales se incluyen: la neutralización alcalina (Kim & Ji, 2023), la adsorción con materiales naturales o subproductos industriales (Baloyi et al., 2023) y procesos avanzados de oxidación. Estas tecnologías, además de mejorar la calidad del efluente, facilitan la recuperación de agua y la valorización de subproductos como lodos y metales recuperados (Demers et al., 2015; Seo et al., 2017).

El proyecto tendrá impactos positivos a nivel ambiental, social y económico. Ambientalmente, permitirá reducir la acidez y concentración de contaminantes en los efluentes, evitando su filtración hacia cuerpos de agua y suelos. Socialmente, contribuirá a disminuir riesgos para la salud de las comunidades aledañas y a fortalecer la percepción de responsabilidad ambiental de la empresa. Económicamente, la optimización del tratamiento reducirá los costos operativos y el riesgo de sanciones.

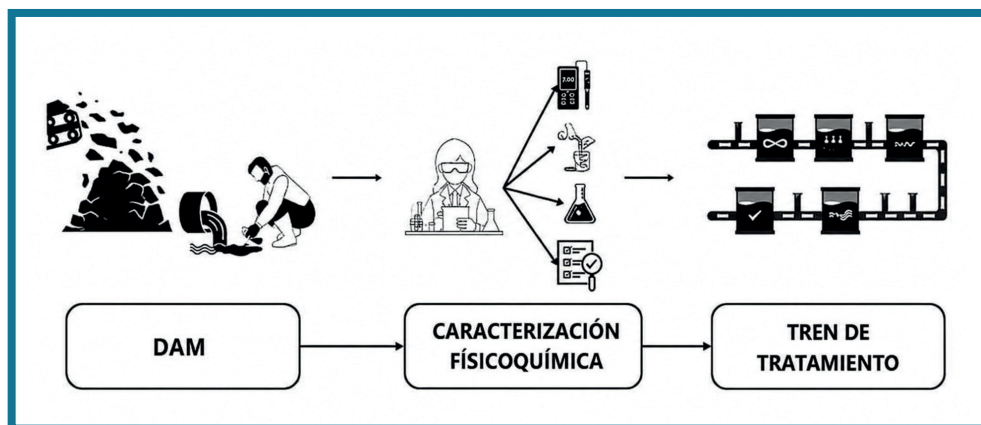
Entre los productos esperados se incluyen un informe técnico de caracterización, una estrategia de gestión ambiental para los DAM, recomendaciones técnicas para optimizar el sistema actual, y una publicación científica derivada del trabajo de maestría. Además, los resultados serán transferibles a otros contextos industriales similares, aportando conocimiento al campo de la gestión ambiental aplicada a la minería del carbón.

En síntesis, esta investigación busca proporcionar una base científica y técnica para la gestión integral de los drenajes ácidos de mina, promoviendo prácticas más sostenibles y alineadas con los principios de economía circular. El diseño de un tren de tratamiento eficiente y replicable no solo contribuirá al cumplimiento normativo, sino también a la mitigación del impacto ambiental de la actividad minera en Norte de Santander y otras regiones con problemáticas semejantes.

Highlights:

1. Caracterización fisicoquímica de drenajes ácidos de mina.
2. Evaluación de alternativas tecnológicas para el tratamiento de DAM.
3. Propuesta de tren de tratamiento eficiente y replicable.
4. Contribución al cumplimiento normativo y a la gestión ambiental minera.

Resumen gráfico:



17

Evaluación de la degradación fotocatalítica de diclofenaco en un reactor de flujo helicoidal usando TiO_2 -P25

Alejandra Marín Orozco,
Gustavo Antonio Peñuela,
Gina Hincapié Mejía

GD CON

Grupo de Investigación Diagnóstico y Control de la Contaminación (GD CON)
Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Este estudio se centra en evaluar el comportamiento de la degradación fotocatalítica de diclofenaco con $TiO_2 - P25$ en un reactor de flujo helicoidal. Durante los ensayos se observó que la fotodegradación es favorecida por un mayor contenido de $TiO_2 - P25$ y los resultados muestran que la degradación del DCF alcanza más del 50% aplicando 0,5 g/L del catalizador a una concentración de 0,1 ppm de DCF. La implementación de un reactor de flujo helicoidal optimiza condiciones clave, como la distribución de luz y la exposición del catalizador, potenciando la eficiencia del proceso fotocatalítico. Los hallazgos contribuirán a ampliar el conocimiento sobre el desempeño del $TiO_2 - P25$ en condiciones de uso prolongado y el efecto de nuevos diseños de reactores, ofreciendo una alternativa más económica y sostenible para la remoción de contaminantes emergentes.

Introducción

A nivel de ingeniería, en los últimos años se ha investigado el diseño, modelado y optimización de fotorreactores heterogéneos para degradar contaminantes en aguas residuales industriales. Aunque se han logrado avances importantes, como geometrías más eficientes para captar y aprovechar la radiación, este no es el único factor clave para escalar el proceso y aplicarlo a nivel industrial. Aspectos como la fluido-dinámica, la naturaleza de la matriz de reacción y el reúso del catalizador requieren atención inmediata en la ingeniería de fotorreactores.

La aplicación de la Fotocatálisis Heterogénea requiere un proceso de separación del catalizador sólido que permita entregar un agua con las características fisicoquímicas que cumplan con la legislación ambiental.

Los Contaminantes Emergentes (CE), como pesticidas, fármacos y componentes de productos de cuidado personal no han sido regulados ni monitoreados de manera estricta y generan una alta preocupación debido a su presencia creciente y persistente en el medio ambiente. Se han detectado contaminantes de preocupación emergente tanto en ambientes terrestres como acuáticos, siendo el agua, en la que más frecuentemente se reporta. Los fármacos como los AINE se usan frecuentemente para reducir dolor, inflamación, fiebre o hinchazón, pero no se asimilan por completo y son excretados. Estos residuos no se eliminan totalmente en las plantas de tratamiento y llegan a cuerpos de agua, donde se ha detectado diclofenaco (DCF), con efectos negativos en organismos acuáticos y posibles riesgos para la salud pública.

Materiales y métodos

Para el sistema experimental se utilizó un reactor de flujo helicoidal de cuarzo, con un diámetro interno de 2,0 cm, externo de 2,2 cm y una longitud total de 13 cm. El reactor fue instalado sobre un captador reflectante para optimizar la irradiación, y todo el montaje se ubicó dentro de una cabina con cinco lámparas de luz UV ($\lambda = 365$ nm y 75 W), garantizando una irradiancia suficiente para activar el fotocatalizador $TiO_2 - P25$. Su volumen efectivo de irradiación fue estimado en $35,5 \text{ cm}^3$, lo que permitió una adecuada distribución de luz UV dentro del sistema.

Para operar en flujo continuo, se conectaron dos mangueras de 1 metro a una bomba de recirculación de 1600 L/h, encargada de mantener el movimiento constante del fluido. Además, se incorporó un aireador en el beaker que contenía la solución, con el objetivo de aumentar el oxígeno disuelto y favorecer la generación de radicales hidroxilos, esenciales en la fotocatálisis heterogénea.

Se empleó un estándar de referencia de DCF como diclofenaco sódico suministrado por Sigma Aldrich (Germany), y DCF comercial en presentación de ampolla inyectable de la farmacéutica Vitalis con un contenido de 75 mg en 3 mL. Se prepararon soluciones stock de 50 mg/L completamente solubilizada y se prepararon las concentraciones evaluadas por medio de dilución. La identificación y cuantificación de DCF en solución acuosa se determinó utilizando el UHPLC-DAD suministrados por Agilent Technologies (California, EE. UU.). Se utilizó una columna Agilent Poroshell 120 EC-C18 ($2.7 \mu\text{m}$, $3.5 \times 150 \text{ mm}$) como fase estacionaria. Además, se utilizó un detector de arreglo de diodos Agilent G1315B (DAD) configurado a una longitud de onda de 278 nm.

Se completó la fase de adecuación e instalación del sistema experimental, compuesto por un reactor de flujo helicoidal fabricado en cuarzo, el cual presenta un diseño compacto y eficiente para la irradiación homogénea del fluido. Se verificó su correcto funcionamiento mediante pruebas hidrodinámicas, evidenciando un patrón de flujo continuo y estable, impulsado por una bomba de 1600 L/h, que asegura la suspensión homogénea de las partículas del catalizador.

La degradación del DCF se muestra en la figura, es necesario un período de adsorción, ya que ciertas reacciones tienen lugar en la superficie del catalizador. Se observa que, a mayor disponibilidad de sitios activos en la superficie del catalizador, mayor será la adsorción del diclofenaco (DCF). Sin embargo, se observa una desorción parcial, atribuida posiblemente al equilibrio dinámico.

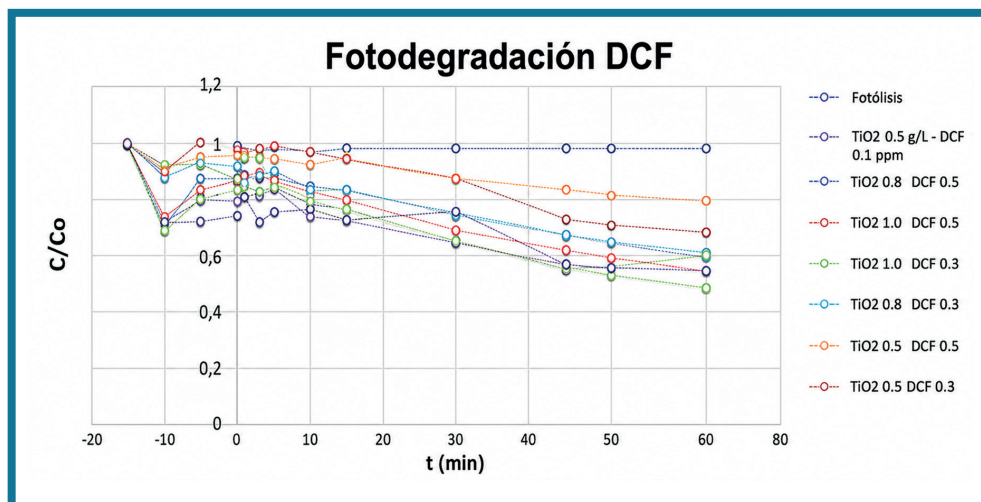
La prueba de fotólisis no presentó degradación del DCF, lo que indica que la radiación, en ausencia del catalizador, no es suficiente para degradar el contaminante. Este resultado confirma que la remoción observada en las pruebas fotocatalíticas se atribuye principalmente a la acción de la luz sobre el TiO_2 . Posteriormente, se aplicó un diseño factorial 3^2 , el cual evalúa el efecto combinado del $TiO_2 - P25$ (0,5; 0,8; 1,0 g/L) y la concentración inicial de DCF (0,1; 0,3; 0,5 mg/L) sobre la eficiencia de degradación del contaminante. Se alcanzó una degradación de aproximadamente el 60% cuando la concentración inicial de DCF fue 0,3 mg/L con una dosis de 1,0 g/L de $TiO_2 - P25$.

Se espera obtener una alta eficiencia en la degradación del DCF mediante la fotocatalisis heterogénea con $TiO_2 - P25$ en un reactor de flujo helicoidal, identificando las condiciones óptimas de operación. Además, se proyecta que el diseño helicoidal del reactor contribuirá a mejorar la distribución de la luz y la exposición del fluido reactivo, aumentando así la eficiencia global del sistema. Los resultados contribuirán al conocimiento sobre el comportamiento del TiO_2 en condiciones reales de operación y al desarrollo de estrategias sostenibles en tratamientos avanzados de agua, con potencial aplicación a escala piloto o industrial.

Highlights:

1. La mayor eficiencia de degradación se alcanzó con 1,0 g/L de $TiO_2 - P25$ y 0,3 ppm de DCF, alcanzando casi un 60% de remoción.
2. La condición menos eficiente fue con 0,5 g/L de $TiO_2 - P25$ y 0,5 ppm de DCF, alcanzando solo un 20% de degradación.
3. Concentraciones más altas de catalizador y menores concentraciones iniciales de DCF favorecen la fotodegradación.
4. El ajuste de la relación catalizador-contaminante es clave para diseñar sistemas fotocatalíticos más eficientes en el tratamiento de aguas con contaminantes emergente.

Resumen gráfico:



18

Monitoreo de la presencia y evaluación de riesgos de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) en el río Medellín

.....

Eva Sandrith Baquero Ramírez,
Gustavo Antonio Peñuela Mesa

GDCON

Grupo de Investigación Diagnóstico y Control de la Contaminación (GDCON)
Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Las sustancias perfluoroalquilo y polifluoroalquilo (PFAS) constituyen una clase extensa y compleja de compuestos químicos orgánicos de origen antropogénico que se han utilizado ampliamente en numerosos procesos industriales de fluoropolímeros e incorporado en una vasta gama de productos de consumo. Sus propiedades únicas, como la repelencia al agua y al aceite, la estabilidad térmica y la reducción de la fricción, facilitan sus aplicaciones clave, que incluyen las espumas formadoras de película acuosa (AFFF), lubricantes, fluidos hidráulicos de aviación, productos de cuidado personal, envases de alimentos, productos de limpieza para el hogar, repelentes de manchas, textiles y diversos recubrimientos y pinturas. La producción mundial de PFAS supera una megatonelada anual, lo que explica su presencia generalizada en prácticamente todos los compartimentos ambientales.

A pesar de su utilidad, estas mismas propiedades, especialmente su notable estabilidad química conferida por sus fuertes enlaces carbono-flúor, conllevan graves desafíos ambientales. Su excepcional persistencia las hace resistentes a los procesos de degradación natural, permitiéndoles permanecer en el medio ambiente durante largos periodos, razón por la cual son apodadas "sustancias químicas permanentes". Una vez liberados, muchos compuestos PFAS demuestran alta movilidad en el agua, son potencialmente bioacumulables en los organismos y han exhibido toxicidad en diversos niveles tróficos. Esta amplia dispersión ambiental plantea riesgos ecológicos importantes, afectando la biota acuática y pudiendo llevar a la biomagnificación hacia aves y mamíferos piscívoros.

Más allá de las consideraciones ecológicas, la exposición a PFAS se asocia cada vez más con una amplia variedad de efectos adversos para la salud humana, incluyendo trastornos del desarrollo, disfunción hormonal, toxicidad hepática y renal, disminución de la respuesta inmunitaria a las vacunas, problemas de fertilidad, dislipidemia, obesidad, hipercolesterolemia y un mayor riesgo de desarrollar ciertos tipos de cáncer, incluidos los renales y pancreáticos. En particular, el ácido perfluorooctanoico (PFOA) ha sido clasificado como carcinógeno humano del Grupo 1 por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), basándose en evidencia suficiente en modelos animales y evidencia limitada en humanos. De manera similar, el ácido perfluorooctanosulfónico (PFOS) ha sido clasificado como posible carcinógeno humano (Grupo 2B).

En reconocimiento de estos riesgos generalizados, organismos internacionales han implementado medidas restrictivas; el PFOA, el PFOS, el ácido perfluorohexanosulfónico (PFHxS) y sus precursores han sido restringidos por el Convenio de Estocolmo. Se han establecido límites regulatorios estrictos en el agua potable en diversas regiones; por ejemplo, la EPA de los EE. UU. implementó niveles máximos de contaminantes (MCL) en abril de 2024, estableciendo límites de $4,0 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ para PFOA y PFOS, y $10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ para otros PFAS clave como PFNA, PFHxS y GenX. Adicionalmente, la Directiva de agua potable de la Unión Europea (UE 2020/2184) fijó un límite de $100 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ para la suma de 20 PFAS y $500 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ para el total de PFAS. No obstante, los desafíos persisten, ya que muchos PFAS, incluidos los análogos de cadena corta altamente móviles, aún no están regulados. Los umbrales basados en la salud continúan evolucionando, como lo demuestra la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (AESA) al reducir su ingesta semanal tolerable (ITS) para un grupo de PFAS principales a $4,4 \text{ ng}\cdot\text{kg}^{-1}$ por peso corporal, indicando que una parte considerable de la población podría superar este límite principalmente a través de la dieta, siendo el pescado, los mariscos y el agua potable las principales fuentes identificadas.

75

Dada la ubicuidad global y la creciente comprensión de los riesgos, la investigación de la presencia y distribución de PFAS en entornos acuáticos es crucial para la evaluación integral de riesgos. Existe una brecha de conocimiento significativa sobre estos compuestos en entornos tropicales y países en desarrollo como Colombia. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar la presencia y distribución de PFAS en corrientes de aguas superficiales del Río Medellín, un río colombiano que discurre por la ciudad de Medellín y su área metropolitana de sur a norte, estimando el riesgo ecológico potencial para la biota acuática y para la salud humana, con el fin de proporcionar una herramienta científica para el desarrollo de regulaciones y estrategias de mitigación en el país.

Para la cuantificación de ácido perfluorooctano sulfónico (PFOS), ácido perfluorooctanoico (PFOA) y otras PFAS, se utilizaron diversos estándares y reactivos especializados, incluyendo la solución estándar nativa M-537.1 ($2000 \text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$) de AccuStandard, la solución estándar de extracción MPFAC-C-ES ($2000 \text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$) marcada por masa y la solución estándar de inyección MPFAC-C-IS ($2000 \text{ ng}\cdot\text{mL}^{-1}$) de Wellington Laboratories, además de metanol (MeOH), solución de amonio (NH_4OH), Trizma®, acetato de amonio, ácido acético y ácido fórmico. Se emplearon cartuchos SPE Supelclean™ ENVI-Carb™ y Bond elut PFAS WAX para la extracción.

El estudio incluyó dos muestreos, uno en época seca y otro en época lluviosa, en las aguas superficiales del Río Medellín. Los puntos de muestreo se organizaron en el tramo de norte a sur e incluyeron: Barbosa (aguas abajo), Copacabana (después de la descarga PTAR Aguas Claras), Niquia (antes de la descarga PTAR Aguas Claras), sector La Macarena, sector Aguacatala (un punto después de la descarga PTAR San Fernando), sector Ayurá (punto antes de la descarga PTAR San Fernando) y el punto aguas arriba en el municipio de Caldas.

Los resultados del monitoreo en el río Medellín mostraron que el PFOS se detectó en el 100% de las muestras, y el PFOA en el 93,3%. A modo de conclusión sobre los resultados obtenidos, se destaca que las concentraciones más altas variaron ligeramente entre los periodos de muestreo: en el muestreo realizado en época seca, las concentraciones más altas correspondieron a PFOA ($0,433 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), PFOS ($0,316 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) y PFHxA ($0,773 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$); mientras que en el muestreo realizado en época lluviosa, las concentraciones más altas se observaron para PFOA ($0,308 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), PFOS ($0,259 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$), PFHpA ($0,22512 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) y PFNA ($0,212 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$).

Highlights:

1. PFAS son compuestos persistentes, con fuerte enlace C-F; son "químicos permanentes".
2. PFOA es carcinógeno Grupo 1; PFOS es posible carcinógeno Grupo 2B.
3. PFOS se detectó en el 100% y PFOA en el 93,3% de las muestras del Río Medellín.
4. El estudio llenó la brecha de conocimiento de PFAS en países como Colombia.

Resumen gráfico:

Monitoreo de la presencia y evaluación de riesgos de sustancias perfluoroalquiladas y polifluoroalquiladas (PFAS) en el Río Medellín

1. Contexto



PFAS sustancias per-y polifluoroalquiladas compuestos químicos persistentes usados en en productos industriales y domésticos.

Efectos: bioacumulación, toxicidad aguda.

Efectos: bioacumulación, toxicidad aguda, riesgos para la humana, daño hepático y renal.

2. Sitios de muestreo



3. Resultados principales

Época seca

100%
PFOS

Mayores concentraciones

PFHxA 0.773

PFOS 0.433

Época lluviosa

93.3%
PFOA

PFOA 0.303 ng/L

PFOS 0.253 ng/L

4. Impacto ambiental



Bioacumulación en organismos acuáticos.

Riesgo ecológico alto en puntos con descargas de PTAR (Aguas Claras, San Fernando).

5. Conclusiones

PFAS presentes de manera generalizada en el río Medellín.

19

Organoleptic characteristics orientation of home brewing beer based on formulation and hopping characteristics

Francisco Danilo Londoño García,
Aída Luz Villa Holguín

Catálisis Ambiental

Grupo de investigación Catálisis Ambiental

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

The Colombian craft beer industry is rapidly growing, with sales volume increasing by over 30 % from 2019 to 2023, demanding research into process improvement and raw material utilization. Hops are critical for beer's organoleptic profile but are not extensively cultivated in the country, posing a significant import challenge in its usage. This creates an opportunity of local products as potential substitutes and focus on efficiency.

Conventional hop extraction methods are inefficient for obtaining iso- α -acids and volatile essential oils, limiting the competitiveness of Colombian craft breweries. Alternatives include complex vacuum extraction MAE, which shortens time and doubles β -myrcene yield compared to conventional methods.

This research aims to achieve high concentrations of key compounds like iso- α -acids and essential oils in beer. We propose using Microwave-Assisted Extraction (MAE) to produce highly efficient hop extracts. This technique enables the pre-transformation of α -acids, which in turn can reduce boiling time and energy costs as a significant process optimization. (as shown in Figure 1)

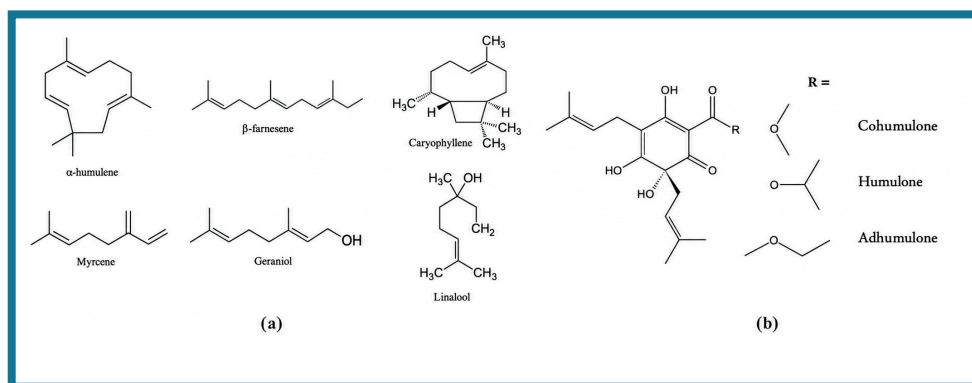


Figure 1. Structure key taste and aroma compounds in beer. (a) Main terpenes found in hops, (b) α -acids.

The study will employ the Design of Experiments (DOE) methodology to model the interactions between MAE parameters (power, time and solvent ratio) and the resulting extract composition. This approach will provide craft brewers with quantitative tools to improve decision-making, develop value-added products, and promote the socio-economic development of local communities through local product appropriation.

Kettle-hopping is a technique that aims for bitterness via α -acid isomerization, but hop utilization is under 50 % and essential oils are lost due to volatility. Late-hopping and dry-hopping focus on aroma, the latter adding essential oils post-fermentation at low temperatures. Using oil fractions or extracts can enhance sweetness and smoothness.

In beer manufacturing, two important compounds in the final product are the content of essential oils and α -acids, because the aroma and bitterness that, respectively, are given by these compounds to the beer. However, essential oils are volatile compounds, and both temperature and time of beer manufacture can affect their composition in the final product. Although early hop addition during wort boiling increases bitterness intensity, as they stimulate the isomerization of α -acids, rapid volatilization of essential oils also occurs due to high temperatures. Late hop addition at any point between the end of boiling or during fermentation, is appropriate for giving higher aroma intensity owing to essential oils; however, since these processes occur at temperatures between 8 °C and 22 °C, the isomerization of α -acids does not take place, and therefore, the bitterness of the beer is low. Therefore, it is important to identify the best way and step, in the beer production process, for adding the hops and quantify the corresponding bitterness and aroma characteristics for finding, in sensory terms, the harmony of flavor and aroma in the beer. That is, according to the beer style description provided by the Beer Judge Certification Program, "to find balance point where neither characteristic imposes itself in such a way that it significantly affects the other".

The isomerization of α -acids is temperature-dependent; its kinetics are crucial since atmospheric pressure dictates boiling temperature in open vessels. Sensory perception relies on the component's threshold, with Geraniol having the lowest threshold (4 mg/L). Fractionation improves sensory analysis. Ethanol in beer affects solubility and perception thresholds for volatile compounds. A trained panel offers stronger sensory correlations with quality.

A full factorial experimental design to improve bitterness level based on iso- α -acids concentration and essential oils concentrations: β -myrcene, α -humulene, β -caryophyllene, linalool and geraniol as outcome or response variables, interactions and allows optimization of the process will be evaluated using microwave power, irradiation time and solvent to sample ratio factor as factors.

From this work, it is expected to obtain a quantitative model to determine both the effect and interaction of microwave parameters and solvent to sample ratio in the extraction of essential oils and α -acids. The results will provide an optimized, energy-efficient method for hop utilization, strengthening Colombia's craft beer industry and promoting sustainable production practices.

Various authors have stated as important to evaluate the effect of power, irradiation time, solvent to sample ratio and their interactions on the extraction of essential oils and α -acids from hops. Additionally, it is also important to establish an experimental design and perform extractions both with microwave-assisted and solvent extraction, to quantify the essential oil profile using Gas Chromatography (GC) and determine α -acids via UV-Vis spectrophotometry, and to model and analyze the effect and interaction of process variables on extraction efficiency using regression analysis, applying hypothesis testing and confidence intervals.

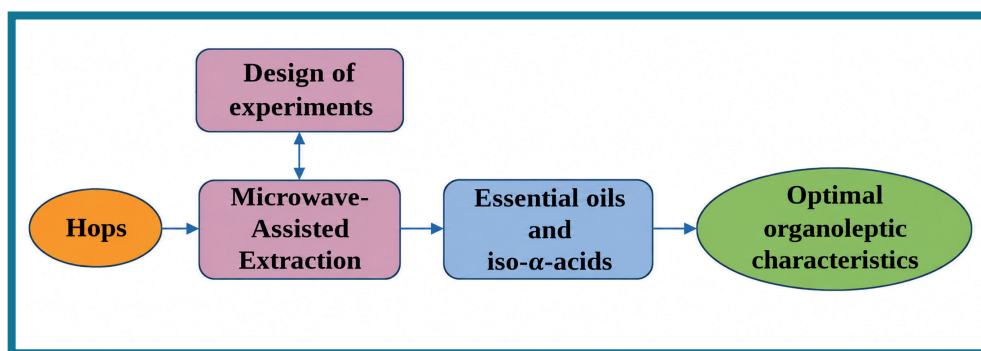
To carry out the experimental runs and obtaining the extracts hops must be conditioned and milled to minimize process variability and then combining them with ethanol as a solvent to proceed to the microwave assisted extraction and collect the components of interest. To ensure precise and reliable data collection for the subsequent modeling, GC coupled ideally with mass spectrometry will be used to quantify the total yield and profile of essential oils, and to determine the concentration of iso- α -acids, standardized procedures of UV-Vis spectrophotometry will be an appropriate technique.

A final stage focuses on building and interpreting the predictive model, to do this it is important to perform normality and homoscedasticity tests, and if the assumptions are met, to use ANOVA to assess factor effects and construct the model. If assumptions are not met, non-parametric methods or the use of data transformations to stabilize variance before regression analysis can be an alternative path because the goal is to model and analyze the effect and interaction of process variables on the extraction efficiency for all response variables.

Highlights:

1. Valorization of local products strengthens Colombian craft market.
2. Microwave assisted extraction helps to reduce energetic costs.
3. Design of experiments is a good tool to generate added value.

Resumen gráfico:





20

¿Cómo han cambiado las coberturas del suelo en las fronteras departamentales de Colombia? Una exploración con imágenes satelitales en el siglo XXI

.....

Marisol De la Cruz Pinta,
Julio Eduardo Cañón Barriga

GAIA

Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental (GAIA)

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia



Resumen:

Los cambios de cobertura son el resultado de interacciones complejas entre variables socioeconómicas y ambientales que reflejan tanto las dinámicas locales propias de las comunidades como la efectividad de las políticas de gestión ambiental. En Colombia, dichos cambios pueden verse contrastados en las áreas limítrofes entre sus diferentes departamentos. Aspectos biofísicos, socio-económicos y políticos contribuyen a estas transformaciones de diversas maneras a diferentes escalas. Estas transformaciones pueden estudiarse detalladamente con imágenes satelitales y clasificaciones de coberturas que discriminan usos del suelo y recursos naturales.

En esta investigación exploramos los cambios de las coberturas en las líneas fronterizas departamentales entre 2000 y 2025, a escala nacional, usando imágenes Landsat 5 y 8 procesadas en Google Earth Engine (GEE). Inicialmente se hizo una previsualización de puntos de interés en los que se identificaban contrastes fronterizos notables en distintos departamentos. Las imágenes se procesaron para obtener un composite de enmascaramiento y eliminación de nubes. La clasificación de cobertura se hizo con Corine Land Cover Nivel 1, mediante el modelo Random Forest, entrenado con una malla de puntos de control y los índices NDVI, NDWI, SAVI y NDSI, que arrojaron un mapa clasificado del año 2000 y uno de 2025. con la superposición de los mapas clasificados de cada año, se hizo un mosaico de rásters en ArcGIS con un recorte de 5 km a cada lado de las fronteras departamentales.

Con respecto a este recorte se determinaron porcentajes y áreas de cambios para analizar la variación y posibles dinámicas que existen en las fronteras departamentales asociadas por ejemplo con diferencias en las políticas, cambios socioeconómicos en el departamento, dinámicas geológicas.

La exploración preliminar de los cambios en las fronteras muestra que el cambio de Bosque a Territorios agrícolas es el más significativo, con aproximadamente 122 mil ha, que corresponden a un 62% de los cambios de cobertura identificados nacionalmente. Este cambio evidencia una gran expansión de la frontera agrícola en 25 años. Sin embargo, también hay que destacar que 561 mil ha han permanecido con su cobertura de Bosque y áreas naturales. Por otra parte, 24 mil ha han pasado de ser Territorios agrícolas a Bosque y áreas naturales, principalmente en la frontera Chocó – Valle del Cauca y Valle del Cauca – Tolima.

Las fronteras que más cambios han experimentado en estos 25 años han sido las de Casanare – Arauca, Bolívar – Magdalena, Bolívar – Cesar, Caquetá – Meta, Antioquia – Santander, estos con cambio principalmente de Bosques a Territorios Agrícolas. Las fronteras que menos cambios han experimentado en este tiempo son las fronteras entre los departamentos de Amazonas, Caquetá, Vaupés, Guaviare y Guainía. En cuanto a las fronteras binacionales, las que más cambios muestran son las de Venezuela – Arauca y Venezuela – La Guajira, así como la frontera con Ecuador – Nariño y Ecuador – Putumayo. Hay cambios menos notorios en la frontera con Panamá – Chocó y casi nulos en la frontera con Brasil – Amazonas, donde ha permanecido la cobertura de Bosques y áreas naturales.

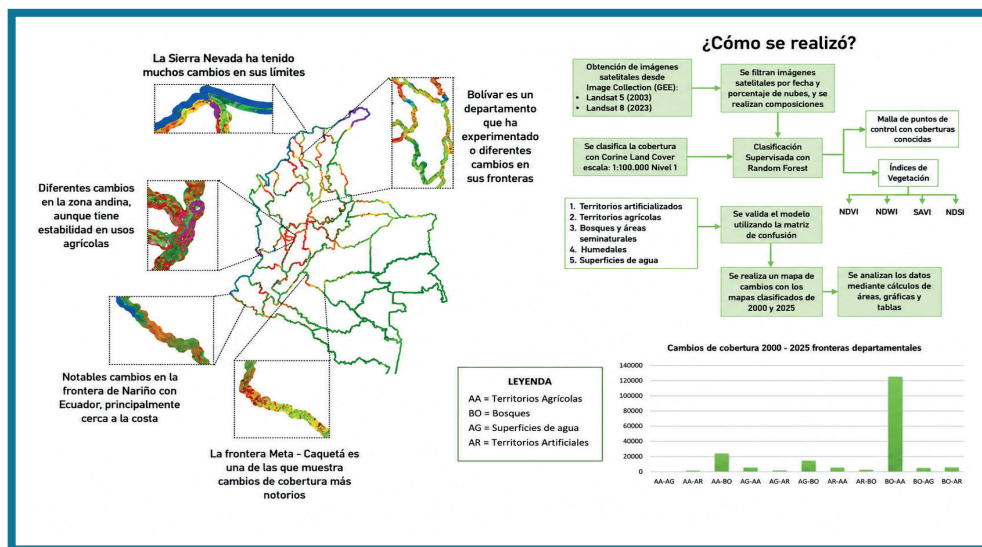
En la zona andina es en donde más se han mantenido y se han expandido los territorios artificializados, justamente porque es en esta zona donde se concentran las urbes. Hay fronteras como la de Magdalena con Atlántico y Bolívar que están divididas por un flujo hídrico y se puede ver claramente como ha variado el flujo, justamente por las dinámicas que presentan los ríos y las poblaciones a sus costados. Esto evidencia que además de los factores sociales, las fronteras pueden estar influenciadas por factores geológicos y geomorfológicos.

El estudio preliminar también demuestra que están existiendo cambios de cobertura en las fronteras departamentales que son diferentes en cada región o sector del país, lo que denota diferencias en sus dinámicas. Es así que, se observó la necesidad de realizar una exploración más profunda y en la que se pretende aumentar el nivel de clasificación a un Nivel 2 de Corine Land Cover, con periodos más cortos para identificar como han evolucionado los cambios y obtener información más detallada.

Highlights:

1. 50% del área de fronteras departamentales presenta cambios de coberturas en 25 años.
2. 62% de los cambios corresponden a transición de Bosque a Áreas agrícolas.
3. Fronteras más cambiantes costa norte, Casanare, Arauca y binacionales (Ecuador, Venezuela).
4. Fronteras menos cambiantes en Amazonía y Orinoquía.

Resumen gráfico:



21

Diseño geométrico del canal de entrada de una turbina de vórtice gravitacional inspirado en la cultura Nazca

Juliana Carvajal Guerra,
Edwin Lenin Chica Arrieta,
Ainhoa Rubio Clemente

GEA

Grupo de Energía Alternativa (GEA)

Facultad de Ingeniería – Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

El presente estudio se centra en la optimización de las turbinas de vórtice gravitacional (TVG), con especial atención a la configuración geométrica del canal de entrada. El objetivo principal es mejorar la eficiencia hidráulica y la estabilidad operativa en sistemas de micro generación. A pesar de las ventajas que presentan las TVG para la generación distribuida de energía, su implementación ha sido limitada por rendimientos variables y generalmente inferiores a los de las turbinas hidroeléctricas convencionales. La hipótesis plantea que un canal de entrada en espiral, inspirado en los "ojos de agua" de los puquios de la cultura Nazca, permitiría impartir momento angular al flujo antes del ingreso al rotor, optimizando así el acople hidrodinámico. En este contexto, la eficiencia de la TVG se cuantifica como la relación entre la potencia de salida (P_{out}) y la potencia teórica disponible (P) en el recurso hidráulico, siguiendo las expresiones descritas por las Ecs. 1 y 2, lo que permite establecer un criterio comparativo riguroso para evaluar distintas configuraciones geométricas y condiciones de operación.

$$P_{out} = T\omega \quad \text{Ec. 1}$$

$$P = \rho g Q H_n \quad \text{Ec. 2}$$

Donde T es el torque ejercido sobre el eje del rotor, ω es la velocidad angular del rotor, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad, Q es el caudal que ingresa a la turbina y H_n es el salto neto o diferencia efectiva de altura entre la entrada de fluido a la turbina y el rotor. La pregunta principal radica en determinar si un canal de entrada inspirado en los "ojos" puede realmente mejorar el desempeño en comparación con diseños rectos o convencionales, lo que implica identificar una geometría óptima y comparar sistemáticamente su rendimiento frente a alternativas tradicionales.

La metodología del estudio se divide en cuatro componentes principales. En primer lugar, se realiza un análisis morfo-funcional de los "ojos de agua" de la cultura Nazca para evidenciar su capacidad de modular vientos y ayudar a conducir el agua mediante accesos helicoidales. Segundo, se desarrolla un marco de modelación numérica mediante CFD, considerando la preparación geométrica, el mallado, la definición de condiciones de contorno y parámetros físicos, la selección de modelos de turbulencia y el tratamiento transitorio, aplicando criterios de convergencia temporal y espacial.

El tercer componente consiste en una fase de optimización estadística, apoyada en Diseño de Experimentos y Metodología de Superficie de Respuesta. Se consideran factores asociados a los parámetros helicoidales del canal y métricas de salida vinculadas con la formación y estabilidad del vórtice; este bloque facilita el ajuste del modelo de segundo orden, la exploración de interacciones y la localización de la configuración óptima.

Finalmente, se realiza una validación experimental mediante un prototipo a escala de laboratorio, que integra un circuito hidráulico recirculante, una cámara de circulación transparente y un rotor instrumentado con sensor de torque para registrar (T), (ω), (Q) y estimar (η) en un rango operativo representativo. El diseño del prototipo está condicionado por restricciones de espacio, infraestructura y caudales disponibles en el laboratorio, procurando mantener relaciones geométricas que aseguren la representatividad del fenómeno vorticial a escala. Se resalta la necesidad de ajustar el ángulo y el desarrollo de la espiral, en comparación con los "ojos de agua" originales, con el fin de compatibilizar la cámara de circulación con las limitaciones prácticas del banco de ensayos y garantizar la generación de un vórtice estable sin inducir turbulencia excesiva.

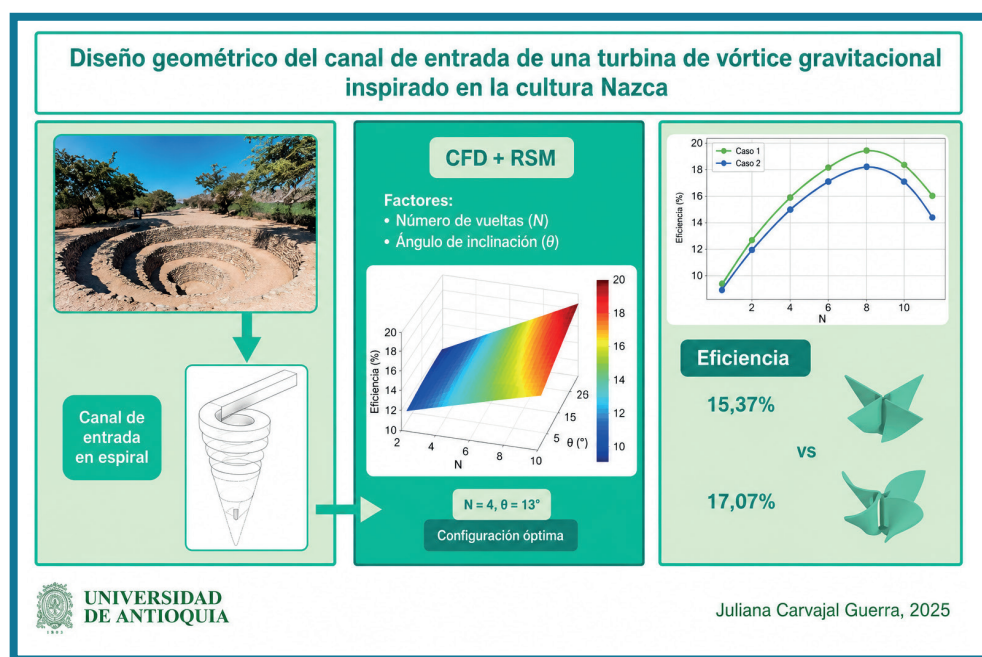
En paralelo, el marco conceptual del estudio sintetiza los principales determinantes del rendimiento en TVG, como el caudal, la altura del vórtice, la geometría de la cámara, el diseño y la posición del rotor, y especialmente la geometría del ingreso.

Las contribuciones esperadas del estudio incluyen: (a) trasladar un principio geométrico ancestral a un problema contemporáneo de ingeniería energética; (b) ofrecer un protocolo reproducible de optimización que integra CFD y estadística para el diseño del canal de una TVG; y (c) establecer un esquema de validación con métricas comparables que fortalecen la trazabilidad entre simulación y experimento. En conjunto, estos aportes buscan reducir la brecha entre el potencial teórico de las TVG y su desempeño real, incrementando la eficiencia y la estabilidad operativa, ampliando la viabilidad técnica y económica de las TVG en aplicaciones rurales y periurbanas, con una afectación ecosistémica mínima.

Highlights:

1. Canal de entrada helicoidal inspirado en los "ojos de agua" Nazca para TVG.
2. CFD+RSM para optimizar la circulación y elevar la eficiencia.
3. Prototipo de laboratorio para validar diseño y métricas de desempeño.
4. Microturbina de bajo costo para la generación distribuida.

Resumen gráfico:



22

Compatibilización y valorización de residuos de películas plásticas multicapa de poliamida/polietileno postindustria

Laura Llicela Gómez Restrepo,
Diego Hernán Giraldo Vásquez

Materiales Poliméricos

Grupo de Materiales Poliméricos

Facultad de Ingeniería - Universidad de Antioquia Calle 70 n° 52-21, Medellín 050010, Colombia

Resumen:

Los empaques multicapa se han consolidado como un componente esencial en la industria del embalaje, particularmente en el sector de alimentos y bebidas, debido a su capacidad para preservar la calidad del producto y reducir el peso de los empaques. Sin embargo, su complejidad estructural representa obstáculos para su reciclaje, especialmente cuando están compuestas por polímeros incompatibles como la poliamida (PA) y el polietileno (PE). La diferencia en polaridad y temperatura de fusión entre ambos materiales impide su reprocesamiento directo mediante técnicas de reciclaje mecánico convencionales, lo que conlleva a que grandes volúmenes de estos residuos terminen en vertederos o incinerados, contribuyendo a la pérdida de valor material y a impactos ambientales significativos.

Ante este panorama, la compatibilización reactiva surge como una alternativa prometedora para promover la miscibilidad entre fases poliméricas inmiscibles y posibilitar su transformación en materiales de valor agregado. Entre los agentes más empleados se destaca el anhídrido maleico (MAH), que, al ser injertado sobre poliolefinas como el PE o el PP, actúa como un puente químico entre las fases polares y no polares, mejorando la adhesión interfacial y estabilizando la morfología del sistema durante el procesamiento. Esta técnica ha demostrado mejorar la procesabilidad, la estabilidad térmica y las propiedades mecánicas de mezclas poliméricas complejas. El presente trabajo se desarrolla siguiendo los principios y objetivos de la economía circular de los materiales, la cual busca reducir la dependencia de recursos vírgenes mediante la valorización de residuos postindustriales y posconsumo, favoreciendo la reincorporación de materiales en ciclos productivos.

En este contexto, el objetivo de la investigación es estudiar el comportamiento reológico de mezclas de PA/PE provenientes de residuos de películas multicapa y compatibilizadas reactivamente, para establecer los parámetros de una ruta de procesamiento en fundido que permita su reciclaje mecánico y posterior uso en productos conformados por inyección o extrusión.

La investigación contempla tres etapas principales. En la primera, actualmente en desarrollo, se realiza la caracterización físico-química, térmica y morfológica de las películas multicapa postindustria. Dicha caracterización busca identificar los constituyentes principales, su disposición en capas y su comportamiento térmico como punto de partida para la formulación de mezclas y el posterior diseño experimental. Como técnicas de análisis se emplean espectroscopía Raman para la identificación de las fases poliméricas, calorime-

tría diferencial de barrido (DSC) para el análisis de transiciones térmicas y grado de cristalinidad, y análisis termogravimétrico (TGA) para determinar la estabilidad térmica de cada componente. Además, la microscopía óptica permite observar la morfología y la distribución de capas en las películas originales.

En una segunda etapa, se formularán mezclas PA/PE incorporando una cantidad de anhídrido maleico (MAH) definida y respaldada por la literatura, junto con un peróxido orgánico como activador para promover la compatibilización reactiva durante el mezclado en fundido. El procesamiento se llevará a cabo en un reómetro de torque, variando la temperatura y la velocidad de mezclado con el fin de estudiar la estabilidad térmica del material y determinar los parámetros de procesamiento que favorezcan la homogeneidad y la procesabilidad del sistema reciclado. Se emplearán análisis reológicos y ensayos para determinar propiedades mecánicas en tensión y medición de resistencia al impacto para evaluar el efecto de la compatibilización sobre las propiedades de las mezclas procesadas.

Se espera que la compatibilización reactiva favorezca una mejor dispersión de las fases y una mayor adhesión interfacial entre la PA y el PE, lo cual puede reflejarse en un incremento moderado de la cristalinidad y, en consecuencia, en la mejora de las propiedades mecánicas. A su vez, una morfología más homogénea y estable tiende a disminuir la viscosidad aparente en el estado fundido al reducir la fricción interfacial y las irregularidades de flujo entre fases inmiscibles. Esta disminución de la viscosidad puede facilitar el procesamiento de las mezclas mediante técnicas como moldeo por inyección o extrusión. Finalmente, la evaluación de la procesabilidad permitirá establecer las mejores condiciones de temperatura, velocidad y contenido de compatibilizante para obtener mezclas estables y reproducibles.

En una tercera fase, se plantea analizar la viabilidad técnica, ambiental y económica del proceso propuesto. Este análisis permitirá determinar el potencial de implementación de la ruta de reciclaje en contextos locales, particularmente en Colombia, donde los sistemas de gestión de residuos plásticos presentan limitaciones estructurales y una baja tasa de aprovechamiento de empaques flexibles, la cual se estima que es menor al 5 % aunque no existe una cifra oficial. La posibilidad de reincorporar estos residuos como materia prima reciclada representaría un avance significativo en la consolidación de cadenas de valor circulares, además de una oportunidad para el desarrollo de nuevos materiales sostenibles de origen secundario.

Si bien el presente trabajo se encuentra en etapa inicial y solo cuenta con los resultados experimentales de la primera etapa, los avances en la caracterización de las películas multicapa PA/PE constituyen una base sólida para el

diseño de las formulaciones y del esquema experimental. La combinación de técnicas de caracterización y procesamiento en fundido permitirá obtener información crucial sobre la compatibilidad entre fases y la estabilidad térmica del sistema, factores determinantes para su posterior aplicación industrial.

En términos globales, esta investigación busca contribuir a la transición hacia una economía circular de los plásticos mediante la implementación de estrategias de compatibilización que permitan valorizar residuos complejos, tradicionalmente considerados no reciclables. Asimismo, se espera que los resultados sirvan como punto de partida para el desarrollo de modelos de gestión integral de residuos plásticos multicapa en el sector de empaques alimentarios, alineados con los principios de sostenibilidad y cierre de ciclos de materiales.

Highlights:

1. Los envases multicapa PA/PE presentan un alto potencial de valorización dentro de la economía circular, aunque su estructura heterogénea y la incompatibilidad entre fases poliméricas dificultan su reciclaje mecánico convencional.
2. La compatibilización reactiva mediante anhídrido maleico y peróxidos orgánicos ofrece una estrategia efectiva para mejorar la adhesión interfacial y la estabilidad térmica en mezclas PA/PE recicladas.
3. El estudio busca establecer las mejores condiciones de procesamiento en reómetro de torque: temperatura, velocidad de rotores y contenido de compatibilizante, para obtener materiales reciclados con propiedades mecánicas y reológicas mejoradas, así como una buena estabilidad térmica.
4. Esta investigación contribuye a la transición hacia una economía circular de los plásticos, proponiendo una ruta viable para reincorporar residuos multicapa en ciclos productivos y desarrollar nuevas materias primas.

Laura Licela Gómez Restrepo



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

Facultad de Ingeniería

AVANCES Y TENDENCIAS en Ingeniería

Vol. 2025: Dossier de Investigación de Maestría y Doctorado