


Lina Patricia Vega
Compilador

Calidad 

Impacto
Ambiental



ediciones
USTA
UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

Comité editorial

Directivos

Fr. José Fernando MANCIPE, O.P.

Rector

Fr. Wilmar Yesid RUIZ CORTÉS, O.P.

Vicerrector Académico

Fr. José Arturo RESTREPO RESTREPO, O.P.

Vicerrector Administrativo-Financiero

Diana Mireya AYALA VALDERRAMA

Directora de la Dirección de Investigación en Innovación

Juan Carlos CANOLES VÁSQUEZ

Director Centro de Recursos Para el Aprendizaje y la Investigación

Katherine Johana AGUJA HERRERA

Decana Facultad de Ingeniería Ambiental

Primera edición, **2025**

ISBN: 978-628-7845-01-5

Corrección de Estilo:

Santiago Marida BORDAMALO ECHEVERRI

Diagramación:

Bertolt Rafael CANARÍA MARIÑO

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



Ediciones Usta

Universidad Santo Tomás

2025

Ediciones Usta Tunja

Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

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

Ley 23 de 1982.

Calidad Impacto Ambiental



Lina Patricia Vega Garzón
Yudy Andrea Londoño Cañas
Edinson Fabián Monroy Ávila
Claudia Rocio Suárez
AUTORES



ediciones
USTA

UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS



Lina Patricia
Vega Garzón

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

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

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



Yudy Andrea
Londoño Cañas

Docente e investigadora vinculada a la escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia. PhD en Ingeniería ambiental, MSc en ingeniería ambiental e ingeniera sanitaria de la universidad de Antioquia. Sus intereses de investigación están enfocados en temáticas relacionadas con procesos fisicoquímicos y biológicos para el tratamiento de aguas, biotecnología ambiental y calidad del agua. Ha participado en proyectos de investigación enfocados en el estudio de sistemas de tratamiento para el mejoramiento de la calidad fisicoquímica, microbiológica y de residuos líquidos resultado del vertimiento del sector productivo, al igual que en la instalación, optimización y puesta en marcha de sistemas de tratamiento y control de contaminación ambiental.



Edinson Fabián
Monroy Ávila

<https://orcid.org/0000-0003-3757-9442>

Ingeniero Ambiental de la Universidad de Cundinamarca, especialista en Aguas y Saneamiento Ambiental de la Universidad Manuela Beltrán, magíster en Tecnologías para el Manejo de Aguas y Residuos de la Universidad Manuela Beltrán, y magíster en Gobierno, Políticas Públicas y Desarrollo Territorial. Ha trabajado como coordinador de instancias ambientales para la implementación de políticas públicas ambientales en el Distrito Capital de Bogotá. Ha sido asesor de despacho en varios municipios, secretario de Planeación e Infraestructura, y docente catedrático e investigador universitario de ingeniería ambiental en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia. También ha sido docente a tiempo completo en la Facultad de Ingeniería Ambiental y la Maestría de Manejo y Sostenibilidad Ambiental en la Universidad Santo Tomás – Tunja. Actualmente, se desempeña como consultor ambiental en sostenibilidad, desarrollo, saneamiento y políticas públicas.



Claudia Rocío
Suárez

Ingeniera Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Boyacá. Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Recurso Hídrico e Hidroinformática de la Universidad de Los Andes. Candidata a Doctora en Recursos Naturales- Universidad de Oviedo (España). Con el proyecto de investigación: Desarrollo de una herramienta de toma de decisiones para implementación de SUDS sistemas urbanos de drenaje sostenible en espacios públicos urbanos en ciudades intermedias. Su investigación se desarrolla en el área del Manejo Sostenible del Agua Urbana, la cual se fundamenta en las líneas de Sistemas de Drenaje Urbano Sostenible, Gestión del Drenaje Urbano y Gestión del Uso y Tratamiento del Agua.

10

Capítulo 1

Análisis de las emisiones generadas por una planta de coquización tipo en el municipio de Samacá, Boyacá (Colombia)

38

Capítulo 2

Minería de esmeraldas en San pablo de Borbur (Boyacá): un análisis de la fractura social derivada del modelo extractivista

56

Capítulo 3

Impacto en los suelos por el uso de pesticidas en cultivos producidos en el departamento de Boyacá (Colombia)

80

Capítulo 4

Estudio hidroclimático de la cuenca del Nevado del Cocuy: efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico del agua y el uso de suelos

110

Capítulo 5

Análisis de la presencia de contaminantes emergentes en agua para consumo humano y sus alternativas de remoción

Capítulo

1

Análisis se las emisiones generadas por una planta de coquización tipo en el municipio de Samacá, Boyacá (Colombia)

Diana Marcela Morales Silva^a,
Oscar Julian Caro Alvarado^a,
Lina Patricia Vega Garzón^{b,c}

^a *Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental.*

^b *Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Grupo GIGA. Tunja, Boyacá, Colombia*

^c *Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental Grupo GICAN*



Resumen

Este capítulo analiza las emisiones contaminantes generadas por una planta tipo de coquización en Samacá, Boyacá, mediante el uso de metodologías estandarizadas (AP-42 y Resolución 909 de 2008). Se describen los procesos técnicos de coquización en hornos tipo colmena y tipo solera, cuantificando sus emisiones atmosféricas. Se identifican los contaminantes principales y se propone el uso de precipitadores electrostáticos secos como alternativa viable para la reducción de emisiones. El estudio concluye con recomendaciones para mejorar la gestión ambiental y reducir el impacto sobre la salud y el entorno.

Palabras clave: *Emisiones atmosféricas, Coquización, Precipitador electrostático, Industria siderúrgica.*

Introducción

El coque es el resultado del proceso de coquización, el cual es una parte importante de la industria siderúrgica a nivel mundial. Es un producto carbónico por destilación seco del carbón a altas temperaturas, siendo un componente esencial en la producción de acero, el cual tiene como capacidad facilitar la eliminación de impurezas y promover la fusión del mineral del hierro, así como su capacidad para actuar como agente reductor en los altos hornos. El coque es esencial para la fabricación de acero de manera eficiente y competitiva, lo cual tiene un impacto significativo en una variedad de industrias (Macri *et al.*, 2019).

China satisface el 80% de la demanda mundial de coque, además cuenta con una de las normativas más estrictas de todo el mundo, en Asia se generan 519,89 millones de toneladas métricas. Por lo general en Europa (incluida la CEI) cuenta con una producción de 78,34 millones de toneladas métricas, mientras que, Según el Ministerio de Minas (2019), Colombia se encuentra en el tercer país exportador mundial, mientras que Norteamérica se queda atrás con 15.93 millones de toneladas métricas, uno de ellos es Estados Unidos con el 66% de la producción (Guerrero, 2022). La industria del coque en Colombia genera más de 1500 millones de

dólares en exportación al año. En el 2021 Colombia experimentó un récord histórico con 4,2 millones de toneladas, además hay alrededor de 10.000 hornos de coquización en departamentos como Boyacá, Norte de Santander y Cundinamarca, (Gómez Reyes, 2018).

El coque colombiano ha ganado gran reconocimiento en la industria siderúrgica por su calidad, enfrentándose a la oportunidad de satisfacer la demanda de naciones que buscan alternativas confiables, según la Federación Nacional de Productores de Carbón el país es un actor importante en el mercado global. además, la producción de coque en Colombia está encabezada por 20 empresas que exportan el 95% del coque al mercado mundial, a las cuales se les concedió un espacio en la *Cumbre Internacional MetCoke 2022* para examinar su participación en la dinámica de la industria del coque y el imperativo de adoptar la sostenibilidad para tener en el largo plazo viabilidad económica y ambiental.

Los Departamentos de Boyacá, Santander y Cundinamarca juegan un papel importante en la producción local en la región, contribuyendo significativamente al suministro global. La habilidad de aumentar la producción resalta la relevancia estratégica de la zona tanto a nivel nacional como global (Urrego, 2022).

En este contexto, las empresas de coquización del Municipio de Samacá en el departamento de Boyacá, Colombia, son actores importantes en Colombia y el mundo, involucradas activamente en la producción y exportación de coque. Sin embargo, la expansión de esta industria presenta obstáculos ineludibles en cuanto a su impacto en el medio ambiente, particularmente en un contexto mundial impulsado por la demanda de prácticas sostenibles (*Corpoboyacá*, 2021).

El proceso de coquización, que ocurre durante la producción de coque, produce emisiones importantes, como material particulado (PM), partículas finas ($PM_{2,5}$), óxidos de nitrógeno (NOx) y

dióxido de azufre (SO₂). Si no se manejan adecuadamente, estas emisiones pueden tener un impacto significativo en el ambiente y por lo tanto en la salud humana. Las consecuencias potenciales incluyen problemas respiratorios, cardíacos, neurológicos y reproductivos, y afectarán de manera desproporcionada a las poblaciones más vulnerables, como niños, adultos mayores, personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, así como a los trabajadores de la coquización.

Este proyecto busca investigar los efectos negativos potenciales de los procesos de coquización en estas industrias, además, el presente estudio tiene como objetivo la propuesta de soluciones fundamentadas en estudios científicos que disminuyan los efectos ambientales y garanticen la estabilidad a largo plazo de la industria del coque en Colombia.

Es positivo observar la implementación de medidas específicas en el caso de una industria tipo de coquización de este municipio, para prevenir y reducir los efectos ambientales relacionados con su operación. El control de emisiones fugitivas y la creación de sistemas de gestión ambiental son ejemplos de un compromiso con prácticas sostenibles. Este método proactivo no solo reduce la exposición a contaminantes, sino que también mejora la calidad del aire en la zona, salvaguarda la salud de la comunidad y preserva el equilibrio ambiental.

Este estudio tuvo como objetivo evaluar integralmente el impacto ambiental derivado del proceso de coquización en una industria de coquización tipo, siguiendo las pautas del estándar AP42 y la resolución 909 de 2088, con el propósito de proponer estrategias para la mejora de las prácticas ambientales en la industria del coque. Para ello se identificaron y describieron los procesos de coquización según la AP42 y la resolución 909 de 2008. Como resultado se realizó un análisis exhaustivo en los diferentes procesos de coquización, enfocándose en identificar las variables críticas, determinando los factores de emisión asociados. Se calcularon las emisiones contaminantes en el proceso de coquización, utilizando

las metodologías y fórmulas estándar AP42 para cuantificar las emisiones de partículas (PM), hidrocarburos totales (HCT), dióxido de azufre (SO₂) y partículas finas (PM_{2,5}) resultantes del proceso. Y por último se propusieron opciones sostenibles para reducir las emisiones con el fin de generar una alternativa basada en evidencia científica y metodologías establecidas para disminuir las emisiones del proceso de coquización, considerando el impacto de los contaminantes en dichos procesos.

Ubicación Geográfica

Samacá es un municipio del departamento de Boyacá que tiene una extensión aproximada de 172,9 km², de los cuales 171,7 km² corresponden a área rural y 1,2 km² a área urbana. Samacá tiene una población activa y una economía diversa que incluye actividades agrícolas, ganaderas y mineras.

Según (Ramos & Benítez, 2017) las zonas productoras de coque en el municipio de Samacá están compuestas por las Veredas Salamanca, Chorrera y Loma Redonda, estas veredas llevan a cabo este tipo de actividad desde los años 60 aproximadamente.

Marco Teórico

Impacto Ambiental de la Industria del Coque

Sanabria et al. (2020) examinaron específicamente las consecuencias medioambientales asociadas a la coquización del carbón, un procedimiento crucial utilizado en la fabricación del acero. La investigación, realizada en el municipio de Samacá, examina la correlación entre las operaciones mineras, la fabricación de coque y sus impactos ecológicos, particularmente en términos de deterioro del paisaje. El estudio se centra en la legislación

ambiental vigente, con énfasis en los impactos generados por los hornos de coque.

En un estudio realizado por Ramos & Benítez (2017) se modela la calidad del aire con base en la dispersión de contaminantes, con énfasis específico en los sólidos suspendidos totales (SST) y material particulado (PM_{10}) provenientes de la región de producción de coque en Samacá. El *software* AERMOD emplea el modelo de dispersión de Gauss para predecir la calidad del aire tanto a nivel urbano como regional. Los resultados sugieren que los niveles de PST y PM_{10} superan los umbrales permisibles establecidos por las normas reguladoras colombianas.

En el estudio de Restrepo & Pinzón (2007) realizaron una estimación de las emisiones producidas durante los procesos de coquización, utilizando metodologías descritas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Los hallazgos sugieren que el material particulado es el contaminante predominante en el municipio de Samacá, originado principalmente por fuentes como patios de acopio y tráfico vehicular.

En el estudio de León P. & Delgado (2005) examinan el manejo de las emisiones atmosféricas dentro de la planta de coquización de la Industria Acerías Paz del Río S.A. El objetivo de este proyecto es evaluar cuantitativamente los contaminantes predominantes y sugerir posibles remedios para cumplir con la normatividad ambiental. Con ello, este proyecto buscaba la mejora de las condiciones medioambientales dentro de la zona designada.

Descripción de los Procesos de Coquización

Hornos colmena

Los hornos colmena son estructuras circulares, el techo es en forma de colmena ya que esto ayuda a irradiar el calor, por lo general estos hornos tienen un diámetro de 3,60 m con una capacidad aproximada de 6 toneladas. Tienen puertas laterales que sirven para hacer el deshorne del coque, en la boca superior hay una boca la cual es más conocida como cúpula en la cual se hace el cargue del carbón y a su vez permite la salida de los gases, al final de la etapa de coquización se realiza el apagado del coque aun dentro del horno y su deshornado es de manualmente (Romero Balaguera, 2014).

Cuando el carbón se calienta en ausencia del oxígeno da lugar a un fenómeno llamado reblandecimiento temporal y una solidificación a temperatura creciente, en esta fase se emiten gases y líquidos volátiles, como la desgasificación primaria se desprenden gases como carbono, hidrogeno y oxigeno durante el reblandecimiento y desgasificación secundaria el máximo desprendido es solo hidrogeno después de la solidificación. además, la rapidez de desprendimiento de materias gaseosas aumenta entre los 350°C y 550°C, después de anularse esta temperatura vuelve a aumentar en los 700°C. Sin embargo, en los 400°C el carbón aumenta su plasticidad poco a poco al reblandecerse, luego comienza a hincharse realizando el fenómeno de una estructura esponjosa sin dejar de desprender gases, es decir el hinchamiento finaliza cuando el carbón comienza a re-solidificarse por efecto de las reacciones pirolíticas que generan el semicoque Báez (2004).

En los 600°C o más inicia la coagulación, luego el proceso de endurecimiento y finaliza después de que la materia carbonosa se aglomera en una ligera concentración en volumen formando coque (Romero Balaguera, 2014), luego se sigue calentando

entre los 1100 y 1300°C por un determinado tiempo llamado estabilización donde la composición del coque y resistencia mejora, en la *tabla 1* se muestran las características del carbón óptimas para coquización, ya sea en carbones de bajo, medio volátil o alto volátil.

Tabla 1. Propiedades de los Carbones Coquizables

Propiedad	Valores		
Clase	Bituminoso		
Grupo	Bajo Volátil	Medio Volátil	Alto Volátil
Dilatación %	> 140	> 40	Entre 0 y 100
Volátiles %	14 a 22	22 a 31	Mayor a 31
Reflectancia de Vitrinita	1.2 a 1.5	0.9 a 1.2	0.7 a 0.9
Hinchamiento (F SI)		> 4	
Granulometría 100%		< 3,14 mm	
Granulometría 86%		< 2,0 mm	
Granulometría 59%		< 1,0 mm	
Granulometría 33%		< 0,5 mm	
Azufre %		< 1	
Humedad %		5 a 8	
Cenizas %		< 10	

Fuente: (Báez R, 2004)

La humedad no afecta la producción de coque, aunque incrementa los costos debido al mayor consumo de energía que esto conlleva al tener carbones muy húmedos, además, el contenido de cenizas del carbón se refleja en el coque producido, finalmente el contenido de materia volátil en los carbones utilizados para la producción de coque metalúrgico varía entre 25% y 36%, mientras que la presencia de azufre actúa como una impureza, y cuando su concentración supera el 1% disminuye la calidad del coque metalúrgico (Báez R, 2004).

La primera batería de esta industria de coquización tipo cuenta con 30 hornos tipo colmena, la capacidad aproximada de cada

horno es aproximadamente de 6 toneladas de carbón, con una eficiencia de producción del 60%, en este proceso se usa el carbón térmico coquizable por su análisis próximo como humedad, ceniza, material volátil, carbón fijo y azufre de poder calorífico (Alarcón Chisino, 2017), mientras que la segunda batería está conformada por 40 hornos, En consecuencia, la producción total estimada de coque se presenta en la Tabla 2, en esta etapa se lleva a cabo el proceso de coquización convencional, el cual se relaciona con los hornos colmena.

El proceso productivo de los hornos tipo colmena en la planta comienza por la extracción del carbón del suelo, para ello la empresa cuenta con proveedores que se encargan de la extracción del mineral, posteriormente el mineral pasa por un proceso de lavado con el fin de eliminar impurezas, barro, tierra y otros elementos, luego el carbón se lleva a los patios y se lleva hacia la moladora, la cual se encarga de dejar el mineral molido, por ello en la primera planta, una empresa maquiladora provee el carbón molido, luego este pasa a una tolva con capacidad de 180 toneladas.

En la tolva se van llenando los coches o vagonetas, las cuales se desplazan por la parte superior de la batería u hornos para llenarlos, y por medio del orificio superior o tapa del horno el coche desprende en su parte inferior el carbón molido e ingresa por la cúpula del horno.

El carbón se caldea dentro del horno para lograr una distribución uniforme; de lo contrario, el coque resultante no tendrá la calidad esperada, ya que el carbón puede quedar crudo en ciertas partes del horno, además el proceso de coquización del carbón en el horno debe durar aproximadamente 72 horas.

Después del caldeo el horno se tapa con ladrillos y arcilla, dejando el mineral dentro del horno durante 72 horas a una temperatura entre 1.000 °C y 1.200 °C, durante este proceso el carbón se convierte en coque debido principalmente a procesos físicos y químicos a los que se somete. Anexo 8.

Pasadas las 72 horas comienza el proceso de extracción del coque manualmente, para esto se quita la puerta de ladrillo y con ayuda de tubería galvanizada se inicia el proceso de enfriamiento del coque durante un tiempo prolongado, posterior a esto el coque tiene que enfriar, luego se extrae el coque con ayuda de un rastrillo largo el cual permita estar al operario estar a una distancia adecuada del horno por su seguridad. Además, se separan las cenizas de coque, luego el coque es almacenado frente a los hornos y en el patio este producto se despacha en volquetas y/o tractomulas, para su exportación.

En la planta o batería 2 a diferencia de la planta 1, esta cuenta con su propio molino para convertir el carbón en carbón fino, el carbón pasa a través de bandas transportadoras y pasan al molino el cual sale el fino que pasa nuevamente por bandas transportadoras, las cuales depositan el mineral en una tolva con capacidad de 240, a diferencia de la anterior batería, la batería 2 está conformada por 40 hornos de tipo colmena.

En esta batería el proceso es igual al anteriormente descrito en la batería 1, además en este proceso de coquización la extracción del coque del horno se hace con bocatas y no de manualmente, este método mecánico es más eficaz porque reduce el tiempo de deshorne, aunque genera daños en la estructura del horno, ya que, al realizar el deshorne estos dañan las estructuras del horno debido a la fuerza incontrolada del bocat a diferencia del deshorne manual.

Más aún, las chimeneas cumplen con la función de depurar los gases de cada horno, estas chimeneas van conectadas a un ducto que a su vez se conecta a cada horno internamente, esto permite el paso de gases en cada uno de los hornos por medio de un agujero llamado ratonera, este permite el paso de los gases generados en la combustión del carbón donde se lleva a cabo la quema de gases en la chimenea la cual tiene como altura 34 metros y realiza un proceso de limpieza de material particulado, no obstante la temperatura de salida del ducto es de 508,75 K, con un caudal de

41112 m³/h, mientras que la presión a la salida del ducto es de 587,2 mm Hg.

Con lo anterior se hace un cálculo para estimar la cantidad de carbón utilizado para el proceso de coquización y la cantidad de coque producido en cada una de las baterías por semana, mes y año como lo muestra la *Tabla 2*, se destaca que en estos cálculos los hornos operan al mismo tiempo en cada batería, sin tener en cuenta los días en los que se hacen mantenimiento a los hornos, entre otras cosas.

Tabla 2. Producción de coque por batería de hornos tipo colmena

Carbón Coquizable - Batería 1						
Tolva	180	Toneladas				
Batería 1	Hornos	Carbón Ton/ Horno 72 hrs	Carbón Ton Batería 72 hrs	Carbón Ton Batería Semana	Carbón Ton Batería Mes	Carbón Ton Batería Año
		30	6	180	360	1800
60% de obtención de coque por cada horno						
Producción Coque	30	3,6	108	216	1080	12960
Carbón Coquizable - Batería 2						
Tolva	240	Toneladas				
Batería 2	Hornos	Carbón Ton Horno 72 hrs	Carbón Ton Batería 72 hrs	Carbón Ton Batería Semana	Carbón Ton Batería Mes	Carbón Ton Batería Año
		40	6	240	480	2400
60% de obtención de coque por cada horno						
Producción Coque	40	3,6	144	288	1440	17280

Fuente: Autores

En este proceso, por cada 6 toneladas de carbón en un horno se obtiene aproximadamente el 60% en forma de coque, es decir,

3,6 toneladas de coque, la producción total coque de las dos plantas por año es de 30.240 toneladas, sin incluir tiempos de mantenimiento ni posibles fallas operacionales que se pueden presentar en los hornos durante el año.

Hornos Solera

Los hornos tipo solera, fundamentales en numerosas industrias, se caracterizan por su funcionamiento continuo: el material ingresa por un extremo y sale procesado por el otro. La cámara de combustión, ubicada en la parte inferior del horno, alberga los quemadores responsables de generar el calor necesario para el proceso. Los gases calientes resultantes de la combustión fluyen a través de la solera, transfiriendo calor al material sobre ella. La duración del proceso varía según la naturaleza de la operación, oscilando desde pocas horas hasta varios días. (León y Delgado, 2005).

Dentro del proceso de coquización en hornos tipo solera se llevan actividades como extracción del mineral, en este proceso se pueden utilizar 3 clases de mineral con la finalidad de obtener una mezcla más adecuada para un mejor rendimiento y calidad.

El carbón es transportado por medio de camiones, posteriormente se descargan en un tolva donde tiene mallas o rejillas de acero con la finalidad de tamizar el tamaño adecuado de carbón, este carbono pasa por bandas transportadoras a un triturador de rodillos los cuales dejan al mineral en un tamaño inferior, este proceso se conoce como trituración primaria, el carbón obtenido es el más indicado en cuanto a la granulometría para la posterior mezcla, si la planta opera con 40 hornos tipo solera, con capacidad de 6 toneladas en cada horno, entonces se requiere de un silo con capacidad de 240 ton, luego pasa a un molino de martillos de los cuales pulveriza el carbón, en este caso la granulometría no debe pasar el 10% por encima de 3 milímetros, luego por medio de transportadores.

El carbón sale de la criba y del molino de martillos y es arrastrado en bandas transportadoras que llevan el carbón hasta los silos de la batería de hornos y en la inferior tiene compuertas móviles las cuales son activados por el mecanismo de la maquina cargadora que funciona mediante una cremallera con la finalidad de cargar los hornos, además, cada batería cuenta con 40 hornos, posicionados en línea recta, en este sentido la batería de hornos es una masa refractaria aislada con el fin de evitar pérdidas caloríficas, las presiones se regulan y se mantienen uniformemente mediante tornillos y resortes en vigas (León P. & Delgado, 2005).

Los hornos de subproductos son cámaras grandes y largas, donde se lleva a cabo el proceso de coquización por el calor producido en la combustión, el cual fue del alto horno que se lleva a cabo en cámaras en los hornos, tiene 4 bocas para cargue, dos puestas facilitan el deshorne de la torta de coque y el otro es para la evacuación del gas bruto, siendo el producto principal de la destilación del carbón. En el calentamiento de los hornos con subproductos se maneja el gas del coque producido, el gas enriquecido, el caudal de aire, y de humos y un sistema de inversión, en estos procesos las baterías de hornos requieren del funcionamiento completo de máquinas que ayudan al proceso de coquización.

La máquina deshornadora es una de las más importantes en este proceso de coquización ya que cumple con la función de quitar la puerta del horno, a su vez empuja la torta de coque al exterior del horno y se nivela la carga dentro del horno , Esta máquina se desplaza por rieles paralelos a la batería, mientras que la máquina guía de coque cuenta con un sistema para quitar las puerta, también tiene un acoplado de corredores para encajar la rejilla junto a la torta de coque, realizando el desplazamiento hacia el sitio de apagado el cual recibe el coque. Al salir del horno, el coque pasa por una banda transportadora con un sistema magnético de separación, seguido de una criba primaria y otra secundaria. El coque que no pasa por las cribas es transportado al alto horno y a la planta de producción de *sinter* (León P. & Delgado, 2005).

Para que el coque que no pasó por las mallas de cribado pase al alto horno es necesario que pasen por el triturador de coque de rodillo, estos se pueden graduar para obtener un tamaño óptimo de coque según lo requerido en el alto horno. Dentro de la decantación se condensa la materia prima y se reduce la temperatura del gas coque, el cual cumple la función de disminuir el volumen para que sea controlado por el extractor, además, la temperatura del gas de 800°C a baja a aproximadamente 75°C. Este cambio ocurre cuando el agua entra en contacto con el coque. El agua y alquitrán producidos salen de los condensadores primarios y tienen luego un proceso de separación.

El gas pasa posteriormente por un tubo extractor, el cual extrae el gas generado en los hornos y lo lleva a las subplantas manteniendo la presión en el colector principal. También bombea el gas a los distintos procesos y por último lo impulsa a los precipitadores electrostáticos donde se recupera el alquitrán

El medio refrigerante utilizado en los colectores y condensadores primarios es el agua amoniacal la cual fluye en un circuito cerrado en continuo contacto con el gas, la circulación del agua amoniacal se hace a través de dos bombas una de estas va al colector y la otra al condensador. El alquitrán, mezcla de componentes del carbón en suspensión, es más denso que el agua y puede separarse del agua amoniacal por diferencia de densidad. (León P & Delgado, 2005)

En la parte de subproductos se extraen sales de amoniaco y el gas sulfhídrico se absorbe y se transforma. Los subproductos se generan en plantas de sulfato de amonio, de gas sulfhídrico y de alquitrán, entre otras.

Producción de coque en hornos tipo solera

En este caso se supone la producción de coque con hornos solera con la finalidad de poder comparar ambos tipos de hornos en los procesos de coquización, cada horno de tipo solera tiene una capacidad de 50 toneladas como lo muestra la Tabla 3, además,

el porcentaje que se maneja en este tipo de horno es del 70% de eficiencia de obtención de coque en cada horno, se destaca que los hornos solera trabajan con un tiempo de horno de 24 a 48 horas y en este caso se opta por las 48 horas.

Tabla 3. Producción de coque por batería de hornos tipo solera

Hornos Solera para Carbón Coquizable						
Tolva	2000	Toneladas				
Batería	Hornos Solera	Carbón Ton Horno 48 hrs	Carbón Ton Batería 48 hrs	Carbón Ton Batería Semana	Carbón Ton Batería Mes	Carbón Ton Batería Año
		40	50	2.000	6.000	30.000
70% de obtención de coque por cada horno						
Producción Coque	40	35	1.400	4.200	21.000	252.000

Fuente: Autores

Este proceso es más óptimo que los hornos tipo colmena ya que tiene una mayor capacidad de toneladas de carbón para coquización, el tiempo que estos requieren para la coquización es menor que los de tipo colmena, además, estos hornos tienen procesos de obtención de subproductos como los anteriormente mencionados.

Impactos Ambientales

Las emisiones que producen los hornos de solera entran en la categoría de efecto medioambiental, entre ellas se incluyen: óxidos de nitrógeno (NOx), los cuales los cuales se forman cuando el nitrógeno y el oxígeno se combinan con el calor, los NOx son irritantes y pueden provocar problemas respiratorios, el dióxido de azufre (SO₂) es un gas corrosivo que se produce cuando se quema azufre en los combustibles fósiles, lo que puede dañar los ecosistemas, además las partículas finas (PM) pueden causar

problemas de salud cuando llegan a los pulmones, por lo que las condiciones de funcionamiento, la eficiencia del horno y el tipo de combustible son algunas de las variables influyen en las emisiones.

Normativa

La resolución 909 del 2008 establece las normas y estándares para el control de emisiones atmosféricas para las emisiones contaminantes con relación al proceso de coquización ya que establece los límites máximos permisibles de emisión para diferentes contaminantes como los óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos, entre ellos emite los estándares de emisión permitidos de contaminantes al aire para fuentes de actividad industrial fija y temporal, así como la determinación del punto de descarga de las emisiones de fuentes fijas y su correspondiente medición.

La Resolución 2254 de 2017 establece la norma de calidad del aire ambiente y se establecen otras regulaciones, en esta se establecen los niveles máximos permisibles de contaminantes al como PM_{10} y $PM_{2.5}$, SO_2 , NO_2 , O_3 y CO .

Comparativo entre hornos tipo solera y colmena

Los hornos de colmena resultan menos eficientes que los de tipo solera, ya que en los hornos solera se manejan procesos de subproductos y los utilizan en el mismo proceso, además, los hornos de tipo solera se implementan cuando se requiere una gran demanda de coque ya que este sistema requiere de una gran inversión tan solo para el prendido de cada horno, a diferencia de los hornos tipo colmena como se muestra en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Comparación entre Hornos tipo Solera y Colmena

Descripción	Horno Colmena	Horno Solera
Toneladas de Carbón molido a introducir por horno	6 toneladas	50 toneladas
Toneladas de coque al ser retirado del horno al finalizar el proceso.	3.6 Toneladas	35 toneladas
Rendimiento	60%	70%
Producción por cada 40 hornos.	144 toneladas	1400 toneladas
Tiempo de residencia del carbón dentro del horno	72 horas	24 - 48 horas
Temperatura máxima alcanzada dentro del horno.	1100 °C	1300 °C
Forma en la cual se retira el coque (producto final) una vez finalizado el proceso de coquización.	Manual	Mecanizado

Fuente: Autores

Estudio de Emisiones Atmosféricas

En los procesos de coquización se generan emisiones atmosféricas, estas se producen en el apagado de los hornos, en fugas no controladas y en las chimeneas, entre otros puntos del proceso. La Resolución 909 de 2008 establece las emisiones que se generan en estos procesos como material particulado, dióxido de carbono e hidrocarburos totales

En el caso de muchas plantas de producción de coque en este municipio en sus procesos no se cuenta con un sistema de lavado de gases, por consiguiente, los datos que se tienen son las dimensiones de la chimenea, caudal, consumo de carbón, temperatura del ducto, presión de salida del ducto, como contaminantes está el material particulado con datos como factor de emisión, emisión, concentración del contaminante como lo muestra la Tabla 5, además se utiliza la ecuación de corrección a condiciones de referencia del artículo 86 de la resolución 909 del 2008, con la cual se corrigen factores de emisión como material particulado y dióxido de azufre.

Tabla 5. Factores de Emisión en los hornos colmena

Contaminante	Valor	Unidades
Altura la chimenea	34	m
Caudal	11,42	m ³ /s
	41112	m ³ /h
Consumo de carbón	6,6	ton/día
Temperatura salida del ducto	508,75	K
Temperatura a condiciones de referencia	298	K
Presión de salida de ducto	587,2	mm Hg
Presión a condiciones de referencia	760	mm Hg
Caudal a condiciones de referencia	5,168	m ³ /s
	18604,8	m ³ /h
Material Particulado		
Factor de emisión	4,53	kg/ton
Emisión	29,898	kg/día
	1,24575	kg/h
Concentración de contaminante	3,030.E-05	kg/m ³
	30,30	mg/m ³
Corrección a condiciones de referencia	66,95119484	mg/m ³
Valor máximo permisible	150	mg/m ³
Flujo contaminante	1,24575	kg/h
Dióxido de azufre		
Factor de emisión	17,23	kg/ton
Emisión	113,718	kg/día
	4,73825	kg/h
Concentración	1,15E-04	kg/m ³
	115	mg/m ³
Corrección a condiciones de referencia	254,1051949	mg/m ³
Valor máximo permisible	550	mg/m ³
Flujo contaminante	4,7325	kg/h

Fuente: Autores

El dióxido de carbono (CO_2) es un subproducto muy común en procesos industriales y proviene de la combustión de combustibles fósiles, su fuente de emisión es en las chimeneas y los ductos del proceso de coquización, los hidrocarburos totales (HCT) son compuestos orgánicos volátiles y no volátiles, y el SO_2 está presente en los procesos de paletización y calentamiento de coque en hornos.

Propuesta de Innovación para la Disminución de Emisiones de Gases en el Proceso de Coquización

Precipitador Electrostático

Un precipitador electrostático moviliza las partículas en el flujo de emisiones hacia superficies colectoras mediante fuerzas eléctricas. A medida que las partículas canalizadas se mueven a través de una corona, una región donde fluyen iones en fase gaseosa adquiere una carga eléctrica. El campo eléctrico generado por electrodos de alto voltaje impulsa las partículas hacia las paredes colectoras. En los precipitadores electrostáticos, las partículas se deslizan hasta una tolva donde se recogen tras ser golpeadas o “martilleadas” por diversas técnicas mecánicas. La tolva se vacía periódicamente. A través de una válvula, el polvo se envía a un sistema de gestión de polvo, como un transportador neumático, donde se elimina adecuadamente. (Rodríguez et al. (2017)

Un Precipitador electrostático de tipo tubo de alambre emite gas que fluye paralela y horizontalmente entre las placas metálicas verticales de la lámina. Las placas suelen estar separadas de 19 a 38 cm, es decir, de 9 a 18 pulgadas. Los cables largos con pesos

en su extremo inferior sirven de electrodos de alta tensión, que quedan suspendidos entre las placas. Algunas versiones más recientes emplean electrodos duros (tubos huecos de 25 a 40 mm de diámetro) en lugar de cables. A medida que el gas se desplaza por la unidad, debe pasar a su vez por cada alambre dentro de cada canal de flujo. Los espacios entre las placas se denominan conductos y altura normal de los conductos oscila entre 6 y 14 metros.

Las fuentes de energía *PE* transforman la electricidad industrial de *CA* (220-480 voltios) según sea necesario en 20.000-100.000 voltios de tensión continua pulsante. La tensión aplicada a los electrodos provoca la descomposición eléctrica del gas que se encuentra entre ellos. Esto se conoce como proceso “*corona*”. Los electrodos suelen ser de polaridad negativa porque una corona negativa puede soportar tensiones más altas antes de chispear que una corona positiva. Siguiendo las líneas del campo eléctrico, los iones creados en la corona van del electrodo a las superficies del colector. En consecuencia, cada conjunto de tubos y electrodos genera una zona de carga que las partículas tienen que atravesar. Las partículas de más de 10 μm de diámetro tienen una mayor fuerza eléctrica debido a su absorción de muchos iones en las partículas de menos de 1 μm . Ciertos tipos de pérdidas repercuten en la eficacia del control. (Rodríguez et al. (2017))

Una parte de las partículas -típicamente el 12% de la ceniza de carbón flotante- también es impulsada hacia la corriente de gas por el golpeteo causado por la capa acumulada. Estas partículas canalizadas son procesadas por las partes posteriores, pero no pueden salir de la unidad y quedan atrapadas en la sección final de *PE*. Debido a las holguras necesarias para los componentes internos no electrificados en la parte superior del *PE*, parte del gas puede desplazarse alrededor de las zonas de carga. Este fenómeno, denominado fuga oculta, reduce la eficiencia del proceso. Para capturar el flujo de fuga en las porciones posteriores, se colocan deflectores anti fuga para mezclarlo con la corriente principal de gas. (Rodríguez et al. (2017))

El principio de ionización es esencial para el funcionamiento del PE, donde un campo eléctrico carga eléctricamente a las partículas mientras pasan a través de las placas. El proceso fundamental del dispositivo comienza cuando el gas se atrae hacia los electrodos colectores porque tiene una carga negativa debido a la ionización.

Discusión

Este estudio analiza las emisiones de una planta tipo de coquización y propone mejoras para su control. Se han encontrado resultados importantes que respaldan la propuesta de utilizar un precipitador electrostático seco para reducir las emisiones. Uno de los hallazgos más notables es que, como se ha demostrado en investigaciones previas, como el diseño y prototipo, los precipitadores electrostáticos son efectivos en la reducción de emisiones contaminantes y estos estudios respaldan la viabilidad técnica de la propuesta.

Estos resultados son importantes porque demuestran la posibilidad real de mejorar la calidad del aire en la comunidad circundante mediante el uso de tecnologías avanzadas y sostenibles. La eficiencia demostrada de los precipitadores electrostáticos, con una remoción superior al 99 %, indica que esta solución podría tener un impacto positivo significativo en la reducción de emisiones contaminantes.

Relacionando estos hallazgos con la investigación existente, se ha demostrado que tecnologías similares, como el Recovery ScrubberTM mencionado en el informe *DOE/NETL-2002/1163*, tienen capacidades prometedoras para reducir las emisiones en otras industrias, como el cemento. Esto indica que las soluciones exitosas utilizadas en otros escenarios podrían adaptarse con éxito a esta planta de coquización tipo.

No obstante, es crucial destacar los límites de estas conclusiones. Según los rangos proporcionados, los costos asociados con la

implementación del precipitador electrostático seco pueden ser muy altos. Es importante analizar minuciosamente estas estadísticas en relación con los beneficios a largo plazo y la sostenibilidad financiera de la propuesta. (Epa, 1999).

En el término de las emisiones por contaminantes o cómo podemos percatarnos en el diagrama de flujo y los cálculos realizados , como las salidas ya sea por cada uno de los procesos existentes y la línea que lleva cada uno , con su dato cuantificable presente en el proceso el primer dato que se puede evidenciar es el de carga y fugas de horno colmena y horno solera , los cuales la investigación indicaron 10 % de fuga en puertas con una carga por etapas de Carga por etapas, de 25 a 30 segundos/carga, 44 g de BSO/carga. posterior a esto sigue el proceso de cargado de los hornos colmena y solera con una emisión del material particulado de 7,2 y 13.1400 ton/día, respectivamente, a continuación, se pasa por un conducto de fugas en la puerta de SO₂, NO_x, TOC, CO, con emisiones de 0,234 ton/día; 0,0078 ton/día; 0,033 ton/día; 0,126 ton/día para hornos colmena.

Los contaminantes principales producidos en la planta de coquización analizada fueron partículas (PM), hidrocarburos totales (HCT), dióxido de azufre (SO₂) y partículas finas (PM_{2,5}). Estos contaminantes son extremadamente dañinos para el medio ambiente y la salud humana, y su reducción es crucial para garantizar la salud de la comunidad y la calidad del aire. Se descubrió que, en la región de producción de coque en Samacá, los niveles de sólidos suspendidos totales (SST) y material particulado (PM₁₀) fueron superiores a los límites permitidos por las regulaciones colombianas. Esto demuestra la urgencia de tomar medidas para disminuir las emisiones de contaminantes en las plantas de coquización en Samacá, Boyacá.

Conclusiones

El objetivo de la investigación fue encontrar las variables cruciales involucradas en los procesos de coquización, así como los factores de emisión correspondientes. Se utilizaron métodos y fórmulas estándar AP42 para medir las emisiones de partículas (PM), hidrocarburos totales (HCT), dióxido de azufre (SO₂) y partículas finas (PM_{2,5}) producidas en una planta típica de Samacá, Boyacá, Colombia como resultado del proceso de coquización.

Los hallazgos muestran que el uso de un precipitador electrostático seco en la planta de coquización tipo es una solución efectiva y sostenible para reducir las emisiones de contaminantes producidas durante el funcionamiento de la planta. Este sistema reduciría significativamente las emisiones de partículas y gases contaminantes, mejorando la calidad del aire del vecindario y protegiendo la salud de la comunidad.

Además, se descubrió que la implementación de un sistema de gestión ambiental permitiría una gestión más eficiente de los recursos y una reducción en el consumo de energía. Esto no solo podría mejorar el medio ambiente, sino que también podría reducir significativamente los costos operativos de la planta, se destaca que los precipitadores electrostáticos (*PE*) de tipo cable y otros *PE* solo trabajan las partículas para eliminar y limitar el flujo de gas, pero suelen tener presiones modestas (menos de 13 mm, o 0,5 in) de agua en columna. Por tanto, las necesidades energéticas y los costos de funcionamiento suelen ser mínimos. Pueden alcanzar un rendimiento extremadamente alto con partículas muy pequeñas. Pueden construirse para tolerar altas temperaturas de hasta 700°C (1300°F), y una amplia variedad de temperaturas de gas, su gestión es sencilla cuando se recogen y eliminan en seco, hay muy pocos gastos de funcionamiento. Los Precipitadores Electrostáticos pueden funcionar a altas presiones (hasta 1.030 kPa, o 150 psi) o en vacío. Se pueden gestionar caudales bastante elevados. Finalmente se destaca que el uso de un precipitador electrostático seco no solo reducirá la exposición

a contaminantes, sino que también mejorará la calidad del aire del área influyente, protegerá la salud de la comunidad y mantendrá el medio ambiente en equilibrio.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

- Alarcón Chisino, C. F. (2017). Evaluación de mezclas de carbones térmicos y coquizables en procesos de combustión [Tesis de pregrado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. Repositorio UPTC. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/3030>
- Báez R., I. (Ed.). (2004). Manual de carbones y coquización. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Seccional Sogamoso.
- Corpoboyacá. (2021, septiembre 10). Por primera vez productores de coque y Corpoboyacá logran acuerdo para reducir impacto ambiental. <https://www.corpoboyaca.gov.co/noticias/por-primer-vez-productores-de-coque-y-corpoboyaca-logran-acuerdo-para-reducir-impacto-ambiental>
- Gómez Reyes, T. (2018). Análisis de riesgos e impactos de la minería del carbón y producción de coque en zona de Cundinamarca, Colombia [Trabajo de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/e8694d34-d658-4bf6-b3fc-8a69417487b6>
- Guerrero, G. (2022). Influencia del coque de petróleo (petcoke) en la dársena del puerto comercial de Esmeraldas [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas]. Repositorio PUCESE. <https://repositorio.pucese.edu.ec/bitstream/123456789/2925/1/Gruezo%20Guerrero%20Gilmar%20Ricardo.pdf>
- León P., C., & Delgado, W. (2005). Diagnóstico para el control y manejo de las emisiones atmosféricas en la planta de coquería y subproductos de Acerías Paz del Río S. A., Belencito Boyacá. Ingeniería Ambiental y Sanitaria. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1221

- Macri, M., Sica, D., & Morón, G. (2019). Producción de coque (p. 42). Ministerio de Producción y Trabajo de Argentina. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/14.7_produccion_de_coque_-_final_0.pdf
- Ramos, A., & Benítez, D. (2017). Modelamiento de material particulado emitido por coquización. Municipio de Samacá, Boyacá. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 8(2), 159–169. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6466337>
- Restrepo, M. del P. T., & Pinzón, S. M. B. (2007). Diagnóstico de la calidad del aire del sector industrial coquizador de Samacá. *Energética*, 38, 55–59. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=147019791009>
- Rodríguez, J. F., Alarcón, U. F., García, O., & Benavides, G. (2017). Diseño y prototipo de un precipitador electrostático. *Revista Mutis*, 7(2), 86–95. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7838999>
- Romero Balaguera, S. M. (2014). Aspectos prácticos de la coquización en Cundinamarca y Boyacá. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+D*, 14(2), 37–41. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096187>
- Sanabria, G., Morales, J., & Murcia, N. (2020). Criterios de implementación ISO 14000:2015. Caso de estudio: sector proceso de coquización [Ponencia].
- Urrego, A. (2022, marzo 18). Tres compañías tendrán 34,3% del total del mercado de coque metalúrgico en 2022. *La República*. <https://www.larepublica.co/empresas/tres-companias-tendran-34-3-del-total-del-mercado-de-coque-metalurgico-en-2022-3301490>

Capítulo

2

Minería de Esmeraldas en San Pablo de Borbur (Boyacá): Un Análisis de la fractura social derivada del modelo extractivista

Edinson Fabian Monroy Ávila^a,
Zeidy Juliette Rivera Perilla^a,
Natalia Melissa Vega Piracón^a

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



Resumen

Este análisis aborda la problemática de la fragmentación social en San Pablo de Borbur al occidente de Boyacá, la cual se deriva principalmente del modelo extractivista vinculado a la minería de esmeraldas. Aunque esta actividad ha sido históricamente una fuente de riqueza económica para el país también ha generado numerosos conflictos y desafíos sociales y ambientales en la región. Se empleó una metodología cualitativa basada en el análisis de fuentes bibliográficas y documentos, donde se revisaron los efectos negativos del extractivismo sobre la cohesión social local. A pesar de los esfuerzos de las empresas mineras en el desarrollo comunitario y ambiental, los problemas persisten debido a la interacción compleja entre diversos actores, tales como las empresas, ONGs, el gobierno y la comunidad. Estos desafíos se agravan por las desigualdades económicas, la falta de diversificación económica, las fallas institucionales y la negligencia del Estado, factores que contribuyen al aumento de la desigualdad. Este estudio enfatiza la necesidad de abordar estas dinámicas sociales mediante una distribución más justa de los beneficios económicos, la gestión efectiva de conflictos y la superación de los obstáculos sociales. Finalmente se subraya la urgencia de abordar las causas profundas de la fractura social para fomentar un desarrollo más equitativo y sostenible en la región minera del occidente de Boyacá.

Palabras clave: Conflicto social, Desposesión, Fragmentación social, Desigualdad.

Introducción

La extracción de esmeraldas en Colombia ha sido una práctica arraigada en la historia del país, aportando significativamente al crecimiento económico regional. El departamento de Boyacá, conocido por su abundante riqueza en minerales, especialmente esmeraldas y carbón, ha sido un epicentro de esta actividad (Fuentes López *et al.*, 2021). Municipios como Muzo, San Pablo de Borbur, Otanche, Maripí, Coper, Quípama y Pauna son vitales en esta industria (Sánchez, 2021).

Desde finales de los años 70, el gobierno colombiano ha reconocido y legalizado la explotación de esmeraldas en la región. Las licitaciones abiertas en 1978 representaron un cambio significativo, brindando acceso legal a los grupos empresariales los cuales desplazaron las prácticas locales artesanales (García y García, 2019).

El municipio de San Pablo de Borbur, en la provincia Occidente de Boyacá, ha sido uno de los principales focos de producción y extracción de esmeraldas. Sin embargo, la presencia de compañías mineras y la expansión de sus operaciones han desencadenado conflictos por la propiedad de la tierra, con consecuencias devastadoras como el desplazamiento de comunidades y la pérdida

de sus medios de subsistencia tradicionales (Parra, 2021). Además, la minería ha alterado el entorno y las formas tradicionales de subsistencia de las comunidades locales, exacerbando problemas sociales como la migración forzada, la desigualdad económica y la violencia según lo establecido en el Plan de Desarrollo 2020 – 2023 (Alcaldía Municipal de Borbur, 2020). Estos desafíos se ven agravados por los esfuerzos por modernizar la actividad minera, que han propiciado la captación de la minería artesanal (Ortega *et al.*, 2022). En este contexto, se profundizan los problemas sociales y ambientales que afectan a las comunidades mineras, donde la violencia y la desigualdad continúan siendo persistentes en el territorio.

Autores como Bustos y Santana (2019); Guerrero y Alba (2022), manifiestan que aunque la actividad minera ha sido la principal fuente de ingreso con excelentes utilidades económicas, estas no se han distribuido equitativamente sino se han concentrado, lo que se traduce en pobreza multidimensional, empleo informal, deterioro en la calidad de vida de los habitantes, conflictos éticos, sociales, económicos y ambientales y aumento entre la brecha de los beneficiarios y los afectados en la actividad minera, actividades que han ido profundizando la fragmentación social, donde los trabajadores mineros se enfrentan a condiciones laborales precarias, largas y peligrosas jornadas extenuantes, y a una baja compensación salarial (Parra, 2021) lo que subraya la necesidad urgente de políticas más inclusivas y redistributivas (Baquero, 2022).

La concentración de riqueza en la actividad minera ha ampliado la brecha entre los beneficiarios y los desfavorecidos, perpetuando la desigualdad en la región. Según el estudio realizado por Acuña y Torres (2020), Boyacá destaca como el principal productor nacional de esmeraldas, aportando cerca del 0,5% de las regalías mineras de Colombia lo que equivale a 2.76 millones de dólares, la inequidad en la distribución y asignación para estos municipios productores aún hoy persiste; consecuencia de este desequilibrio económico se refleja en la falta de acceso a empleos formales para

el 96% de la población, de acuerdo al plan de desarrollo municipal (Guerrero y Alba, 2022).

De este modo se percibe que la minería ha impactado negativamente en las comunidades locales, generando migración forzada, violencia, apropiación de tierras y falta de oportunidades, exacerbando la desigualdad y la pobreza en la región. Según el catastro Minero 2018, en San Pablo de Borbur existen 52 concesiones mineras y 14 autorizaciones ambientales relacionadas con la explotación de esmeraldas (Alcaldía Municipal de Borbur, 2020). Estas cifras ilustran el alcance de la actividad minera en la zona y sus implicaciones para las comunidades locales, donde la lucha por la tierra y los recursos naturales se ha convertido en una constante, profundizando aún más las divisiones socioeconómicas y ambientales en la región.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar en profundidad los impactos sociales generados del modelo extractivista derivado de la minería de esmeraldas en San Pablo de Borbur, Provincia del Occidente de Boyacá, con un enfoque particular en la fragmentación social. A través de esta investigación, se buscó comprender las dinámicas sociales que surgen como consecuencia de esta actividad extractiva, así como identificar posibles vías para mitigar los efectos negativos y promover un desarrollo más equitativo y sostenible en la región. Este enfoque permitió no solo comprender mejor las complejidades de la extracción de esmeraldas, sino también ofrecer recomendaciones prácticas para abordar los desafíos sociales y ambientales que enfrentan las comunidades locales.

Materiales y Métodos

Este estudio se enmarcó en una metodología cualitativa de investigación no experimental, destinada a explorar en profundidad los impactos del modelo extractivista derivado de la

minería de esmeraldas en San Pablo de Borbur, con un enfoque específico en la fragmentación social.

El Municipio de San Pablo de Borbur, situado en la provincia del Occidente de Boyacá, a unos 65 km de la ciudad de Chiquinquirá. Geográficamente, se encuentra en una latitud de 5°45'0" norte y una longitud de 74°4'59" oeste, con una altitud promedio de 815 metros sobre el nivel del mar. Limita con los municipios de Otanche, Muzo, Pauna y Florián. San Pablo de Borbur es conocido por albergar varios depósitos de esmeraldas, siendo la mina de Coscuez uno de los más destacados a nivel mundial por su producción en este sector. Además, la agricultura y la ganadería son actividades económicas relevantes en la región.

La recolección de datos se llevó a cabo mediante una revisión de la literatura existente sobre minería de esmeraldas, modelos extractivistas y fragmentación social en contextos similares a San Pablo de Borbur. Se analizaron documentos gubernamentales, estudios previos, registros históricos y comunicados de empresas mineras relacionados con la actividad en la región.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis temático, identificando y categorizando los temas relacionados con los factores sociales y el papel de los actores externos en la fragmentación social en San Pablo de Borbur. Se utilizó un enfoque interpretativo para comprender en profundidad las dinámicas sociales, económicas y ambientales asociadas con la minería de esmeraldas en la región.

El análisis de los datos recopilados se centró en identificar los factores sociales predominantes y los impactos de los actores externos, incluidas las empresas mineras, en la fragmentación social en San Pablo de Borbur. Esta interpretación se utilizó para generar conclusiones sobre los efectos del modelo extractivista en la comunidad y para identificar posibles vías de mitigación de los efectos negativos.

Resultados

Ortega *et al.* (2022), manifiestan que se han identificado diversas iniciativas que tienen como objetivo abordar los desafíos inherentes a la actividad minera en la región de San Pablo de Borbur.

Fragmentación Laboral

Entre estas iniciativas, destaca el esfuerzo de las empresas mineras por generar empleo formal en la localidad mediante programas de capacitación y empleo dirigidos específicamente a la población local. El objetivo de estas acciones es reducir la informalidad laboral y combatir la pobreza multidimensional en la comunidad, aunque los resultados no han sido efectivos. Según el estudio realizado por Acuña y Torres (2020), aunque las empresas mineras ofrecen oportunidades de empleo en la región, no todos logran acceder a ellas debido a la limitada disponibilidad de vacantes o a las discrepancias con las políticas empresariales, las cuales han transformado la dinámica de la empleabilidad en el territorio, pasando de empleos informales a formales que, en algunos casos, no resultan inclusivos. Esta situación ha generado tensiones y desafíos, dificultando el establecimiento de un compromiso efectivo entre las empresas mineras y la comunidad local.

Estas políticas laborales implementadas por las empresas mineras han tenido un impacto significativo en la exclusión social en San Pablo de Borbur, como señala Meneses (2011). Esta exclusión se manifiesta en diversas esferas, afectando el ámbito económico, la participación social y política, y el acceso al bienestar público. La contratación de mano de obra proviene en muchos casos de municipios cercanos generando exclusión laboral de la mano de obra de la población local, lo que ha contribuido al aumento del desempleo en la región y ha exacerbado la pobreza, según lo evidencia el estudio de Caldas (2016).

Como resultado de la fragmentación laboral, se han reconfigurado las situaciones de pobreza en San Pablo de Borbur derivadas de las distintas formas de exclusión social, como también se ha observado en el análisis de Acuña y Torres (2020). Estos procesos de reestructuración económica, la falta de oportunidades laborales y la ausencia de inclusión en el tejido empresarial han acentuado las desigualdades sociales en la región, limitando las oportunidades de desarrollo económico y bienestar social para la población local.

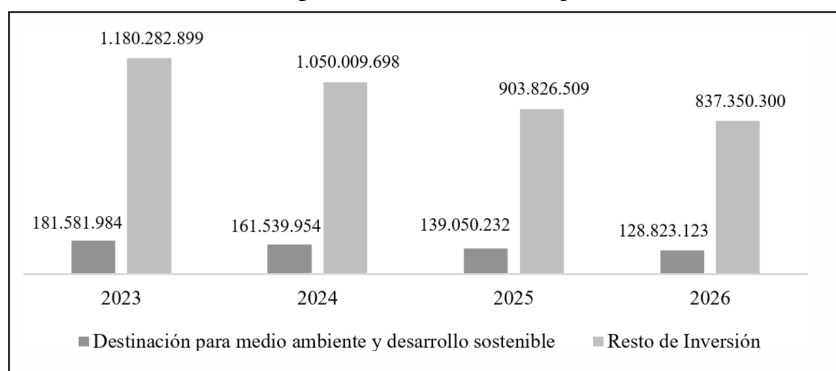
Fragmentación Asociada a la Baja Inversión de Compensación Social

En respuesta a los desafíos sociales y económicos generados por la actividad minera en San Pablo de Borbur, el municipio ha implementado una serie de medidas para mitigar los impactos negativos y promover un entorno más sostenible. Estas iniciativas incluyen mecanismos de compensación y beneficios sociales, como el pago de regalías y la creación de fondos comunitarios, destinados a mejorar la calidad de vida de los residentes locales (Guerrero y Alba, 2022).

Las regalías, derivadas de la explotación de recursos naturales en la región, se utilizan para financiar proyectos de desarrollo social, infraestructura básica, programas de salud, educación y otros servicios públicos. Según los datos proporcionados por el Sistema General de Regalías, en los últimos años, se ha observado una asignación insignificante de recursos para el medio ambiente y el desarrollo sostenible en San Pablo de Borbur. Por ejemplo, en 2023 se destinaron \$181.581.984 pesos colombianos, cifra que según el *SICODIS* se proyecta disminución progresiva en los años siguientes, llegando a \$ 128.823.123 pesos colombianos en 2026, de donde se evidencia que los daños ambientales generados por esta actividad en costos y externalidades ambientales son incalculables.

En la *Ilustración 1*, se muestra cómo la disminución en la asignación de recursos para el medio ambiente y el desarrollo sostenible plantea dudas sobre la efectividad de las medidas implementadas para mitigar los impactos ambientales de la actividad minera a largo plazo. Aunque se destinan recursos considerables para el desarrollo social y la infraestructura básica, es crucial analizar la distribución de estos fondos y evaluar si están siendo empleados de manera eficiente para atender las necesidades prioritarias de la comunidad.

Ilustración 1. Asignación de inversión de compensación social



Fuente: SICODIS, Plan de Recursos del Sistema General de Regalías.

Por lo tanto, es crucial evaluar si las políticas de asignación de regalías están alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible, la protección del medio ambiente y la recuperación social en Colombia. Para ello, se requiere una supervisión continua y una evaluación rigurosa de los proyectos financiados con regalías, a fin de garantizar que contribuyan de manera efectiva a la mejora de las condiciones de vida de la población y al desarrollo sostenible del municipio.

En relación al análisis del resto de la inversión, que forma parte de la asignación para la inversión local en los próximos años, se observa una tendencia a la disminución de los recursos asignados. Esto plantea desafíos significativos ante las crecientes necesidades de la comunidad en áreas como educación, infraestructura vial y

otras iniciativas prioritarias del plan de desarrollo municipal. Estas asignaciones a menudo resultan insuficientes para cubrir todas las necesidades identificadas, lo que limita la implementación efectiva de políticas públicas integrales para el desarrollo de San Pablo de Borbur. Por esta razón, se hace urgente una revisión del sistema general de regalías, tanto en términos de asignaciones como de las tarifas pagadas por las empresas mineras, para asegurar una distribución equitativa y eficiente de los recursos, que promueva un desarrollo sostenible y reduzca la fragmentación social en la región.

Fue crucial repensar la asignación de recursos y las tarifas de las empresas mineras en la explotación de esmeraldas para asegurar que las necesidades prioritarias de la comunidad recibieran la atención y el financiamiento adecuados. Una tarifa justa y equitativa podría haber proporcionado recursos adicionales para financiar proyectos de desarrollo y mitigar los impactos negativos de la minería en San Pablo de Borbur. Esto no solo habría contribuido a construir un futuro más próspero y sostenible para la comunidad, sino que también habría fortalecido la cohesión social y promovido un mayor bienestar para todos los residentes locales.

Ante la insuficiencia de recursos provenientes de las regalías para abordar las necesidades educativas en San Pablo de Borbur, la administración local debió explorar otras fuentes de financiamiento. Esto incluyó la búsqueda de asociaciones con entidades públicas y privadas para cofinanciar proyectos educativos, aprovechar los *Ingresos Corrientes de Libre Destinación (ICLD)* para cubrir diversas necesidades educativas y acceder a créditos para la implementación de iniciativas a corto y largo plazo, lo que resultó en una baja inversión frente al costo de las necesidades sociales que aún persistían en el territorio.

La Fragmentación Social Generada Por la Monocultura Empresarial

Este término se usa cuando pocas empresas tienen un control significativo sobre el mercado y puede influir en las condiciones laborales, económicas y sociales de la comunidad local, esta fragmentación social es evidente a través de una serie de factores interrelacionados. La presencia dominante de empresas mineras ha consolidado la actividad extractiva como la principal fuente de ingresos, lo que ha generado una dependencia económica significativa en la población local. Sin embargo, esta dependencia no siempre se traduce en beneficios equitativos para la comunidad, ya que las decisiones y políticas empresariales pueden generar desigualdades socioeconómicas y tensiones dentro de la sociedad.

Esta situación se ve agravada por la falta de diversificación económica en la región, lo que hace a la comunidad vulnerable a las fluctuaciones en los precios de los minerales y a los cambios en las políticas empresariales. Además, la distribución desigual de los beneficios económicos, sumada a la escasa participación de las comunidades locales en la toma de decisiones mineras, ha generado resentimiento y divisiones dentro de la población.

En este municipio, la presencia de organizaciones no gubernamentales (ONG) desempeña un papel crucial en la vigilancia y defensa de los derechos humanos. Sin embargo, su eficacia se ve limitada por la falta de respuesta y control efectivo por parte del gobierno. La ausencia de una regulación adecuada por parte del Estado ha dejado a la comunidad expuesta a los impactos negativos de las actividades mineras, perpetuando la impunidad y profundizando la fragmentación social.

Fragmentación Social Generada Por el Estado

La fragmentación social generada por el Estado se refleja en una serie de dinámicas complejas que evidencian la ineficacia institucional y la falta de protección de los derechos fundamentales de la población. A pesar de su responsabilidad como garante de los derechos humanos y regulador de las actividades empresariales, el gobierno muestra una marcada incapacidad para controlar las prácticas abusivas de las empresas multinacionales en la región minera (Baquero, 2022). Esta falta de acción efectiva contribuye directamente a la descomposición social, perpetuando condiciones precarias para la población sin ofrecer mejoras sustanciales en sus condiciones de vida.

La sociedad local se encuentra atrapada en un ciclo de violencia histórica, explotación económica y negligencia estatal, lo que refuerza la fragmentación social. El miedo y la ausencia de movimientos sociales significativos mantienen a la población en un estado de silencio, alimentado por la naturalización de la violencia y la resignación ante la falta de respuesta por parte del Estado (Bustos y Santana, 2019). Este contexto de sumisión y apatía contribuye aún más a la división y fragmentación dentro de la sociedad, perpetuando un ciclo de vulnerabilidad y desigualdad.

La interacción entre el Estado y otros actores externos configura un escenario complejo donde la fragmentación social persiste debido a la falta de regulación estatal efectiva, la impunidad judicial y la explotación económica perpetrada por las multinacionales. A pesar de la resistencia local y del trabajo de las ONG, su impacto se ve limitado por la urgente necesidad de una respuesta gubernamental adecuada que proteja y promueva los derechos fundamentales de la población. En este contexto, la falta de acción del Estado continúa siendo uno de los principales impulsores de la fragmentación social en la región.

Análisis de Las Distintas Causas de Fragmentación Social

Tras examinar las diversas causas y tipos de fragmentación, que incluyen la fragmentación del Estado, la asociada a la baja inversión, las condiciones laborales y la generada por los monopolios empresariales, es fundamental abordar la fragmentación social de manera integral.

En este contexto, se observa que la fragmentación social generada por la actividad minera en San Pablo de Borbur ha dado lugar a una profunda desigualdad económica y social en la región. A pesar de las ganancias económicas derivadas de la minería de esmeraldas, estas no se distribuyen de manera equitativa entre la población local. Esta distribución desigual de la riqueza perpetúa la brecha entre aquellos que se benefician económicamente de la minería y quienes luchan por satisfacer sus necesidades básicas. Actualmente, la región enfrenta altas tasas de pobreza multidimensional y un incremento del empleo informal, lo que dificulta el acceso equitativo a servicios esenciales como la educación y la salud para amplios sectores de la población.

La desigualdad económica y social no solo refleja una brecha en los ingresos y la riqueza, sino también en el acceso a oportunidades y recursos. Las comunidades marginadas y desplazadas enfrentan obstáculos adicionales para mejorar sus condiciones de vida, perpetuando el ciclo de desigualdad. Esta disparidad socioeconómica también contribuye a la pérdida de cohesión social y al incremento de los conflictos relacionados con la propiedad de la tierra y los recursos naturales. La falta de participación y consulta de las comunidades locales en las decisiones que afectan sus vidas agrava aún más la exclusión social, alimentando la sensación de injusticia y marginación.

Así, la fragmentación social se traduce en desigualdad económica y social, con consecuencias devastadoras para la salud y el bienestar

de la población. La falta de acceso a servicios de salud de calidad y la exposición a condiciones laborales precarias aumentan los riesgos para la salud física y mental. Además, la pérdida de tradiciones culturales y la erosión de los lazos comunitarios son manifestaciones adicionales de la profunda fragmentación social generada por la actividad minera en San Pablo de Borbur.

Finalmente, en el contexto de las comunidades mineras, la fragmentación social tiene repercusiones significativas, especialmente para las mujeres rurales. Aquellas que han perdido familiares o cónyuges en accidentes mineros o debido a la violencia enfrentan una situación de extrema vulnerabilidad. Se ven obligadas a afrontar desafíos abrumadores, como la escasez de alimentos, la pobreza y las condiciones de vida precarias que son parte de su día a día. Estas mujeres son doblemente afectadas, tanto por la violencia como por la desigualdad estructural arraigada en la actividad minera. Esto subraya la urgencia de intervenciones específicas dirigidas a abordar sus necesidades y fomentar su empoderamiento socioeconómico.

Conclusiones

La minería de esmeraldas en San Pablo de Borbur ha generado una profunda fragmentación social, exacerbando las desigualdades económicas y sociales en la región. A pesar de las riquezas generadas, los beneficios no se distribuyen equitativamente, lo que perpetúa la brecha entre los sectores que se benefician directamente de la actividad minera y aquellos que luchan por satisfacer sus necesidades básicas.

La región enfrenta altos índices de pobreza multidimensional y un aumento del empleo informal. Esto limita el acceso a servicios esenciales como educación y salud, y crea un entorno en el que las comunidades marginadas y desplazadas enfrentan barreras adicionales para mejorar sus condiciones de vida, perpetuando así el ciclo de desigualdad y exclusión social.

La dependencia económica de la minería sin una diversificación adecuada hace que la comunidad sea vulnerable a las fluctuaciones del mercado y a las decisiones empresariales. Además, la concentración de riqueza y poder en manos de unas pocas empresas mineras refuerza la exclusión social y genera molestias sociales.

La contratación de mano de obra proveniente de municipios cercanos ha generado exclusión laboral. Esta dinámica refleja una fragmentación social marcada por la falta de oportunidades laborales para los residentes locales, lo que agrava las disparidades económicas y sociales.

Las mujeres rurales, especialmente aquellas que han perdido a familiares o cónyuges debido a accidentes mineros o violencia, se encuentran en una situación de extrema vulnerabilidad. Enfrentan desafíos abrumadores, como la escasez de alimentos, la pobreza y condiciones de vida precarias. Además, son doblemente afectadas por la pérdida de familiares y la desigualdad estructural arraigada en la actividad minera, lo que subraya la necesidad urgente de intervenciones específicas para fomentar su empoderamiento socioeconómico.

Para lograr un desarrollo más equitativo y sostenible en la región, es imprescindible abordar las dinámicas de poder, distribución de recursos y participación comunitaria. Esto no solo contribuiría a mitigar los efectos negativos del modelo extractivista, sino que también fortalecería la cohesión social y mejoraría la calidad de vida de los residentes locales.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

- Acuña, S., & Torres, J. (2020). Análisis multitemporal de los problemas socioambientales derivados de la actividad de explotación esmeraldífera en el municipio de San Pablo de Borbur-Vereda Coscuez 2020 [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional UDFJC. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/25996/Acu%C3%B1aSaavedraStephany2020.pdf?sequence=9&isAllowed=y>
- Alcaldía Municipal de San Pablo de Borbur. (2020). Plan de desarrollo: Sembrando futuro por San Pablo de Borbur 2020–2023 [Plan de desarrollo]. https://sanpablodeborburboyaca.micolombiadigital.gov.co/sites/sanpablodeborburboyaca/content/files/000399/19932_plan-de-desarrollo-20202023.pdf
- Baquero, V. (2022). Acción colectiva: Jóvenes del Occidente de Boyacá construyendo territorialidades a partir de memorias colectivas de un conflicto [Tesis de maestría, Universidad Externado de Colombia]. <https://doi.org/10.57998/bdigital.handle.001.12849>
- Bustos, M. V. B., & Santana, L. A. (2019). La esmeralda como mecanismo de crecimiento en el municipio de Muzo con la llegada de la empresa minera Texas Colombia [Trabajo de grado, Universitaria Agustiniiana]. Repositorio Uniagustiniana. <https://repositorio.uniagustiniana.edu.co/handle/123456789/928>

- Caldas, L. (2016). Plan de desarrollo: San Pablo de Borbur, compromiso de corazón 2016–2019 [Plan de desarrollo]. https://sanpablodeborburboyaca.micolombiadigital.gov.co/sites/sanpablodeborburboyaca/content/files/000071/3516_plan-de-desarrollo-20162019-alcaldia-municipal.pdf
- Fuentes López, H. J., Ferrucho-Parra, C. C., & Martínez-González, W. A. (2021). La minería y su impacto en el desarrollo económico en Colombia. *Apuntes del Cenes*, 40(71), 125–150. <https://doi.org/10.19053/01203053.v40.n71.2021.12225>
- García, J., & García, M. (2019). Acumulación de capitales, el marco detrás del conflicto en el Occidente de Boyacá. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 9(2), 189–200. <https://doi.org/10.19053/20278306.v9.n2.2019.9173>
- Guerrero, S., & Alba, T. (2022). Centro de regeneración socioeconómico San Pablo de Borbur [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio USTA. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/46130/2022TatianaAlbaSamuelGuerrero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Meneses, C. (2011). Pobreza y exclusión social: Buenas prácticas para la inclusión. *Hábitat*. <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n49/acmen.html>
- Ortega, A., Ochoa, É., & Gil, S. (2022). Retos para la explotación sostenible de esmeraldas en Colombia. *Fuentes, El Reventón Energético*, 20(1), 73–85. <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistafuentes/article/view/13503>
- Parra, J. (2021). El laberinto de las esmeraldas: Incertidumbres

y dificultades de la minería en el Occidente de Boyacá, Colombia. *AVA*, 38(11), 515–2413. https://www.ava.unam.edu.ar/images/38/n38a11_00.pdf

Sánchez, M. (2021). Planteamiento de medidas de manejo de aguas de minería, estériles y pérdida de la cobertura vegetal para la mina de esmeraldas Gavilanes en Chivor (Boyacá) [Trabajo de grado, Universidad El Bosque]. <https://hdl.handle.net/20.500.12495/7334>

Capítulo

3

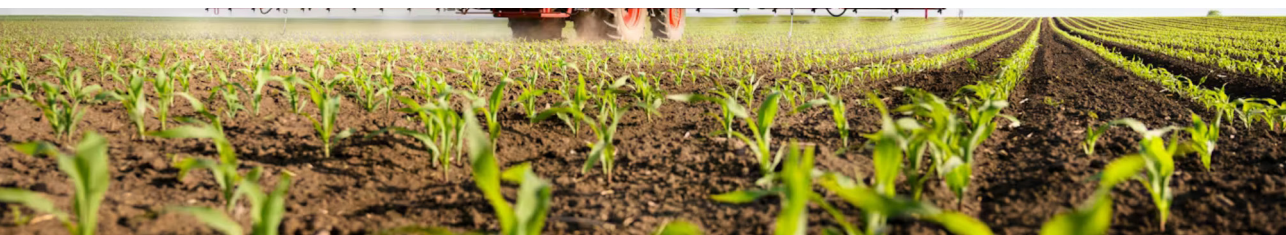
Impacto en los suelos por el uso de Pesticidas en cultivos producidos en el departamento de Boyacá (Colombia)

Heidy Dayany Cuevas Bonilla^a,
Camila Andrea Hernández Montañez^a,
Lina Patricia Vega Garzón^{b,c}

^a Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería ambiental.
Semillero Calidad y Tecnologías Ambientales

^b Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia Grupo GIGA.

^c Universidad Santo Tomás. Facultad de Ingeniería Ambiental Grupo GICAN



Resumen

El capítulo examina el impacto del uso intensivo de pesticidas en los suelos agrícolas del departamento de Boyacá, Colombia. A nivel global, el uso de estos productos químicos ha aumentado significativamente, afectando la calidad del suelo, el agua, el aire y la biodiversidad. En Colombia, Boyacá destaca por su alta actividad agroindustrial, especialmente en cultivos como cebolla, papa y caña panelera, lo que conlleva un uso intensivo de pesticidas. El estudio utilizó una metodología mixta: revisión bibliográfica y análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) con ArcGIS. Se evidenció que, aunque solo el 11,1% del suelo de Boyacá es apto para agricultura, el 53,6% se destina a usos agropecuarios, lo cual implica una sobreutilización del recurso. La aplicación frecuente y mal manejada de pesticidas genera degradación del suelo, lixiviación, pérdida de fertilidad y riesgos a la salud humana.

Palabras clave: Aglutinante, Biomasa, Biocombustible, Economía circular, Energías alternativas, Humedad, Reutilización.

Introducción

A partir de la segunda mitad del siglo XX el uso de los suelos se caracterizó por el incremento de la productividad agrícola, y de esta manera favoreciendo la inclusión y aplicación de pesticidas en general, sin tener en cuenta los efectos secundarios causados por estos, frente a la exposición contaminante a los ecosistemas con impactos ecotoxicológicos y toxicológicos (Frédéric Pierlot, 2023). En relación con lo anterior, los recursos tierra y agua a nivel mundial representan un gran desafío, según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Se proyecta que para 2050 habrá 9100 millones de habitantes, por lo cual, demandará mayor cantidad de alimento. Es así como la seguridad alimentaria y la disponibilidad de los recursos naturales representan gran incertidumbre (FAO, 2011) (Riyaz Muzafar, 2021). Además, en conjunto con el *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)*, en un informe destacan que contaminación de los suelos tiene en peligro la producción de alimento, agua y aire, que son vitales para el desarrollo de todas las formas de vida (FAO, 2021).

Dentro de las actividades determinantes que contribuyen al deterioro de los suelos se encuentran las industriales, mineras, la deficiente gestión de desechos, extracción y procesamiento

del petróleo y el carbón, e inadecuadas prácticas agrícolas, puntualizando en que el uso de plaguicidas ha tenido un incremento del 75% para 2017, por tanto, para 2030 aumentará al 85% con un uso aproximado de 2300 millones de toneladas en la utilización de productos químicos dentro de los cuales se encuentran los pesticidas. (FAO, 2021 / Rueter, 2022). Esto lleva a una contaminación por pesticidas, por ende, la degradación la calidad de la tierra, agua, aire, riesgos a las personas, la flora y la fauna (Secil Tuzun Dugan, 2023).

Dado que, para 2020 de acuerdo al informe Atlas los productores de estos ha tenido un crecimiento lucrativo de 4% por año en las ventas globales, dejando de lado los daños incalculables ambientales que producen y los efectos a causa del uso de los pesticidas (FAO, 2020). Actualmente el 11% de la superficie terrestre es utilizada para agricultura, lo cual hace referencia al 70% de agua extraída de corrientes fluviales, acuíferos y lagos (FAO, 2011). Los problemas causados por la aplicación intensiva y dilatada de los pesticidas en suelos agrícolas generan dramáticos problemas ambientales, principalmente el deterioro de la tierra (Riyaz Muzafar, 2021) debido a la toxicidad intencional y aplicación en la superficie (Li Zijian, 2015).

La dependencia de los pesticidas se relaciona en la agricultura principalmente para el manejo y control de plagas, las cuales afectan los diversos cultivos. Ya que los diferentes bichos y enfermedades que aparecen para alimentarse de las plantaciones provocan el daño de miles de estos y afectante económicamente a millones de campesinos que dependen de la actividad, también interrumpen la disponibilidad de productos al sector urbano (Riyaz Muzafar, 2021) (Prem Rajak, 2023). Puesto que, la gestión agrícola en el mundo para intensificar la productividad y rendimiento (Mathavan Vickneswaran, 2023), usan componentes orgánicos persistentes, los cuales se encuentran en los medios ambientales en forma de sedimentos, aire, agua, suelo y biota (S.P.J. Van Leeuwen, 2013 / Lesly Tejeda-Benítez, 2023) consecuencia del manejo inadecuado, acumulación, translocación, efectos de

lixiviación y posteriormente el transporte mediante escorrentías agrícolas, siendo los principales culpables de daños irremediables a los ecosistemas <Nitin Kumar Singh, 2023 / Lu Xiaohui, 2024 / Song Shan-Shan, 2023>. Sumado a esto, la demanda de estos impide regulaciones en su comercialización, ya que hacen parte de una gran cantidad de productos en su elaboración poseedores de sustancias químicas potencialmente tóxicas (Zijian, 2014), que según estudios contaminan los suelos y aguas, crean resistencia en los insectos problema, reduce la biodiversidad y causan daños fisiológicos en vegetación (Mercedes Carranza - Patiño, 2023).

Por ende, una de las graves consecuencias que deja el empleo de estas sustancias tóxicas es la amenaza latente a los organismos polinizadores, aquellos insectos (entomofilia) principalmente que participan en el 80% de los cultivos en el mundo (Riyaz Muzafar, 2021), donde la tasa de mortalidad es preocupantes, además de las modificaciones genéticas e impactos en los servicios ecosistémicos (Yusuf Shehu Folaranmi Gbolahan, 2023), siendo estos organismos valiosísimos desde lo ecológico hasta lo económico, para la producción de alimentos y biodiversidad (Warner Summer, 2024 / Cecchetto Franco, 2023). En efecto, la agricultura intensiva promueve la contaminación por NOx los cuales afectan significativamente la capa de ozono, provocando su deterioro y dando paso a que los rayos del sol penetren intensamente contribuyendo con el cambio climático (Adriana Carbajal - Armenta, 2022).

Por su parte, es importante mencionar que Latino América y el Caribe es uno de los mayores consumidores de pesticidas en el mundo, dado que estudios realizados demostraron la presencia de estos en aguas subterráneas son las más afectadas a consecuencia del uso y gestión del suelo. (Sebastián Iván Grondona, 2023). Colombia por sus características geográficas se destaca por la agricultura con cultivos de arroz, papa, plátano, maíz, tomate, yuca, entre otras y frutas como el mango, la piña, el plátano, la papaya y el aguacate son las frutas tropicales con gran valor comercial, las cuales se producen y comercializan en el mundo, por tanto, la

utilización de pesticidas en estos cultivos para manejo de plagas y enfermedades representa un factor de riesgo para el recurso suelo de gran relevancia, ocupando el quinto lugar a nivel mundial por su uso con 17000 toneladas/año y el tercer consumidor a nivel Latino América. <M. Quintana - Mejía, 2022 / Diana Angélica Varela - Martínez, 2019 / Diana Angélica Varela-Martínez, 2019>. En las regiones altoandinas, en productos predominantes (tomate, banano, flores, caña de azúcar, palma aceitera, etc.) con alto uso de pesticidas, tanto así que afecta los sistemas productivos a campo abierto y las tierras; por toxicidad, persistencia, niveles de uso y condiciones de aplicación, evidenciando así la falta de información, seguimiento y control (Luis Alejandro Arias, 2021 / Diego Valbuena, 2021).

El Departamento de Boyacá a nivel nacional tiene gran incidencia y es conocido como uno de los corredores agroindustriales, es por ello que los cultivos de cebolla, papa, entre otros, son predominantes en parcelas pequeñas y orografías montañosas tropicales. De allí que la evaluación de riesgo para el suelo es alta por el uso de pesticidas (Camacho William Roberto Alza, 2016 / García-Santos Glenda, 2016). Muestra amenaza con ocurrencia de problemáticas significativas como lo es pérdida de fertilidad de los suelos, acidificación de los suelos, resistencia de especies y enfermedades a estos productos, lixiviación de nitratos y afectación a la diversidad biológica, generando riesgo a los ecosistemas de la región por exposición a estos contaminantes por las múltiples toxicidades que poseen por la permanencia en la superficie y sedimentos luego de ser suministrados. (Laura Navarro, 2021).

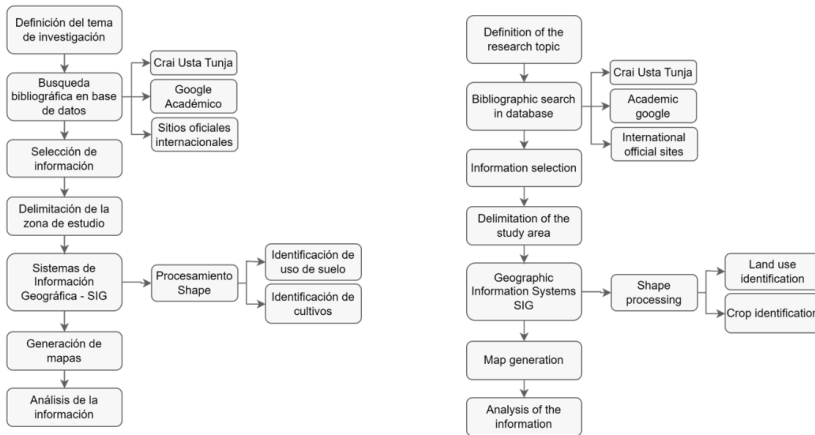
Por lo descrito anteriormente, esta investigación trata sobre la incidencia de los pesticidas en el suelo los cuales se utilizan para diversos propósitos en cultivos que se producen en el departamento de Boyacá, para esto se hace un análisis del uso de suelo en la región mediante la identificación de los tipos de cultivos que son predominantes, para así determinar el área que está destinada actualmente a la agricultura en el territorio.

Metodología

Para la presente investigación se tuvo en cuenta la metodología cualitativa mediante la búsqueda bibliográfica sistemática de artículos científicos en las bases de datos en revistas indexadas mediante recursos electrónicos del CRAI USTA Tunja, por medio de las plataformas *ScienceDirect* y *Scopus*, adicionalmente *Google Académico* y sitios *web* oficiales internacionales e informes publicados por la FAO. Por su parte, con lo concerniente a la metodología cuantitativa se utilizó el *Sistema de Información Geográfica - SIG* con la herramienta para mapeo y razonamiento espacial el software ArcGIS, en la cual se procesó el *shape* de uso de suelos para el departamento de Boyacá.

A continuación, se pueden observar en la *Figura 1: Metodología de investigación*, las etapas descritas para la realización del estudio:

Ilustración 2. Metodología de investigación



Fuente: Autores, 2023

Esta metodología de investigación indica las fases que se tuvieron en cuenta como eje fundamental para mantener el hilo conductor y lograr el propósito con que se llevó a cabo, tal como:

- **Definición del tema:** la investigación se basa en el estudio de las consecuencias que tiene el uso de pesticidas en los cultivos en Boyacá.
- **Búsqueda bibliográfica en bases de datos:** por medio de la cual se permitió la indagación sobre el tema, facilitando el orden de la información que va de lo general a lo particular, iniciando con la búsqueda global, luego continental, seguida de la nacional y cerrando con la regional.
- **Selección de la información:** la preferencia de aquellos artículos científicos e información consultada, donde se recopilaron los que generaron mayor respaldo teórico para la contextualización del estudio.
- **Delimitación del área de estudio:** para mayor conceptualización y área de interés se tomó el departamento de Boyacá.
- **Sistemas de Información Geográfica:** mediante la herramienta *ArcGIS* con el procesamiento del *shape* se hizo la identificación de uso de suelos, los tipos de cultivos del territorio y así determinar el área relacionada a agricultura.
- **Generación de mapas:** como fuente gráfica facilita la visualización y comunicación de la información geográfica e interpretación a la hora del análisis de la región de estudio.
- **Análisis de la información:** basados en el paso anterior se destacaron las particularidades de la información geográfica cuantificable para ser interpretada y procesada de forma cualitativa, en pro de alcanzar los objetivos con que se realizó la investigación.

Resultados y Discusión

Boyacá es uno de los principales productores de alimentos del país, generando el 80% de la producción nacional de cebolla concentrada en los municipios de Aquitania, Sogamoso, Tota y

Cuítiva. Además de la cebolla, la región destaca por otros cultivos como papa, yuca, maíz, caña panelera, café, cacao, y frijol entre otros (IGAC, 2016).

El 11,1% de la superficie de Boyacá es considerada arable o con capacidad agropecuaria, sin embargo, a la fecha el 53,6% de su área se destina para la agricultura y la ganadería. Este contraste entre la capacidad del suelo y su uso real se evidencia en todo el departamento, que alberga cultivos o ganadería, cuando debería concentrarse principalmente en municipios como Puerto Boyacá, Saboyá, Santana, Toguí, Moniquirá, entre otros (IGAC, 2016).

Estudios IGAC indican que los suelos deberían dedicarse a la protección ambiental o a la producción forestal, debido a que el 84,7% de los suelos en Boyacá son no arables y deben estar destinados a la conservación. Sin embargo, actualmente, solo el 42,6% se destina a actividades forestales de protección o producción (IGAC, 2016).

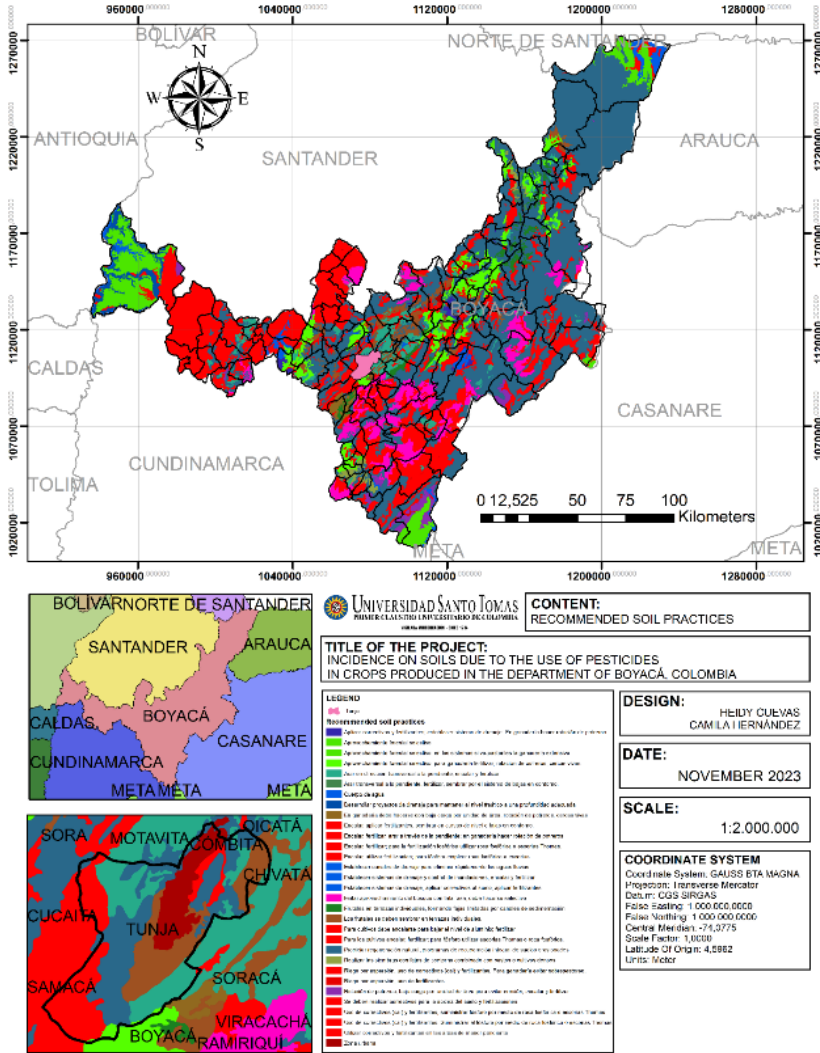
Según el Tercer Censo Nacional Agropecuario (*DANE*, 2016), la extensión total de suelo es de 2'277.667 hectáreas. De este total, el 27.1% (618.532 ha) está cubierto por bosques naturales, el 67% (1.542.268 ha) se utiliza para actividades agropecuarias, el 3.6% (82.367 ha) tiene usos no agropecuarios, y el 1.5% (34.500 ha) se asigna a otros propósitos y coberturas.

De las 1'542.268 hectáreas destinadas a actividades agropecuarias, el 57.1% (881.383 ha) son pastos, el 22.8% (351.472 ha) es rastrojo, el 19.6% (307.793 ha) es área agrícola, y el 0.1% (1.619 ha) es dedicado a la infraestructura de actividades agrícolas y pecuarias. En cuanto a las 307.793 hectáreas utilizadas en agricultura, el 86.2% (265.469 ha) se dedica a cultivos, el 13.2% (40.539 ha) está destinado como área de descanso, y el 0.6% (1.785 ha) está en barbecho (*DANE*, 2016).

Adicionalmente, el *IGAC* informó que Boyacá ocupa el decimotercer lugar a nivel nacional en cuanto al porcentaje de su área afectada por conflictos de uso del suelo. Aproximadamente el 48,3% de sus suelos experimenta un uso inadecuado, distribuido en un 42,5% debido a la sobreutilización y un 5,8% por subutilización. En contraste, el 48,5% de la superficie respeta la vocación y capacidad genuina del suelo.

Es importante destacar que solo el 18% del territorio cuenta con estudios semidetallados, un factor limitante que obstaculiza la realización de un ordenamiento productivo y ambiental acorde a las características específicas de sus suelos (*DANE*, 2016).

Ilustración 3. Prácticas que se deben hacer según los suelos de Boyacá



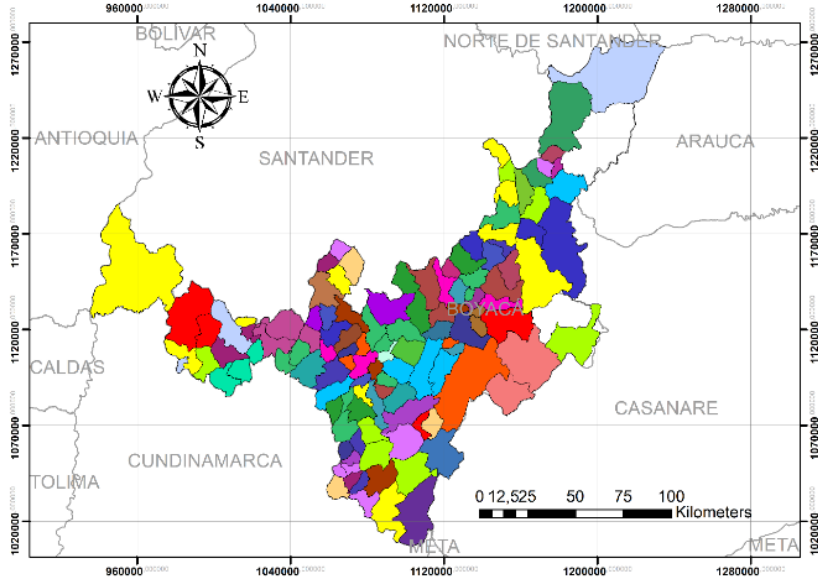
Fuente: Autores adaptado de "Capacidad de Uso de las Tierras del Territorio Colombiano del IGAC"

En las zonas montañosas de Boyacá, el ganado y los cultivos inadecuados han llevado a la compactación del suelo, reduciendo su capacidad de resiliencia y aumentando el riesgo de movimientos en masa, especialmente durante periodos prolongados de lluvia. La falta de cobertura vegetal expone estas áreas a deslizamientos y derrumbes, siendo más vulnerable en suelos sobreutilizados y con pendientes pronunciadas (*DANE*, 2016).

Esta problemática también afecta las zonas cercanas a los ríos, ya que la deforestación y la actividad agropecuaria sin control en las zonas de ronda y amortiguación aumentan el riesgo de desbordamientos al retirar la barrera natural de la vegetación (*IGAC*, 2016).

Para mitigar estos efectos, se recomienda aplicar prácticas de manejo del suelo en Boyacá, especialmente en municipios con suelos afectados por la agricultura descontrolada en zonas de alta pendiente. Se sugiere implementar sistemas que incluyan árboles como agro o silvopastoriles en las zonas montañosas, contralar la escorrentía con sistemas de zanjas, la adecuada disposición de cultivos y la siembra de vegetación densa para disminuir el movimiento del agua y fomentar la infiltración. Además, se aconseja proteger las diversas coberturas para disminuir el impacto de la lluvia, evitar la compactación causada por la explotación ganadera y el uso inadecuado de maquinaria agrícola, y realizar la labranza de manera conservacionista en pendientes menores al 30%. Estas medidas buscan minimizar los riesgos de derrumbes y deslizamientos en la región (*IGAC*, 2016).

Ilustración 4. Cultivos de Boyacá



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGROPECUARIAS

CONTENT:
 CROPS PRODUCED IN BOYACÁ

TITLE OF THE PROJECT:
 INCIDENCE ON SOILS DUE TO THE USE OF PESTICIDES
 IN CROPS PRODUCED IN THE DEPARTMENT OF BOYACÁ, COLOMBIA

LEGEND	
□ Municipios	■ DURAZNO
■ ACUACATE	■ ELUJA
■ AHUYAMA	■ "OJÍF"
■ ARNEQAND	■ FLORES Y FOLIAJES
■ ARAUZA	■ FRESA
■ ARRACACHA	■ GRANADILLA
■ ARVEJA	■ IBEA
■ AVEÑA	■ LIMÓN MANDARINO
■ BANANO	■ JULIO
■ BREVO	■ VALZ TRADICIONAL
■ CACAO	■ MANGO
■ CADUCO POLVOS	■ MORA
■ CAFE	■ NAPA
■ CAÑA MIEL	■ PIÑA
■ CILINDRO DEL BULLDO	■ PIÑA-AYA
■ CHIRIMOYA	■ PLATANO
■ CIRUELA	■ UVAJUDO NEGRO
■ CITRICOS	■ TOMATE DE ARRÓI
■ CLAVILL	■ TRIGO
■ CIRIBUA	■ UVA
	■ VIDA

DESIGN:
 HEIDY CUEVAS
 CAMILA HERNÁNDEZ

DATE:
 NOVEMBER 2023

SCALE:
 1:2.000.000

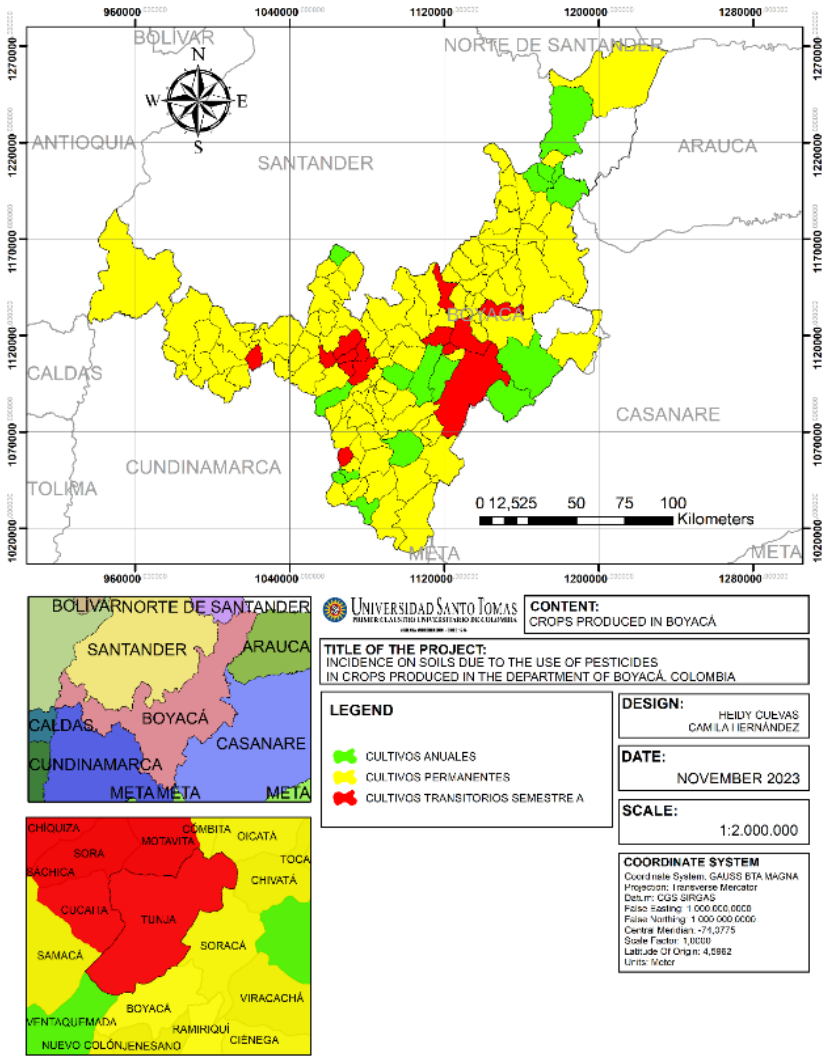
COORDINATE SYSTEM
 Coordinate System: GAUSS BTA MAGNA
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: CGS SURGAS
 False Easting: 1 000 000,0000
 False Northing: 1 000 300,0000
 Central Meridian: -74,0775
 Scale Factor: 1,0030
 Latitude Of Origin: 4,8962
 Units: Meter

Fuente: Autores adaptado de
 "Evaluaciones Agropecuarias por Consenso Departamento de Boyacá"

Los cultivos permanentes son aquellos que, una vez plantados y alcanzada la madurez productiva después de un período considerable, generan múltiples cosechas sin necesidad de ser replantados, como es el caso del café, cacao y aguacate. Según la Encuesta Nacional Agropecuaria del *DANE*, estos cultivos, caracterizados por su largo periodo vegetativo, producen cosechas anuales a lo largo del tiempo sin requerir replantación tras cada cosecha. Esto incluye herbáceas con periodo vegetativo corto pero gestionadas como cultivos permanentes, como caña panelera, caña de azúcar, banano y plátano.

En el ámbito de los cultivos permanentes, destaca la caña panelera, que constituye el 36% del total, seguida por el café con un 21% y el cacao con un 0,8%. En términos de rendimiento, la cebolla en rama y la caña miel son los productos principales. Respecto a los cultivos transitorios, la papa ocupa la posición más destacada, evidenciando un significativo aumento en las áreas sembradas para el año 2010. Le siguen en importancia el maíz tradicional (11%), el frijol y la cebolla de bulbo (0,5%). En el caso de los cultivos anuales, la yuca se posiciona como el cultivo representativo.

Ilustración 5. Temporalidad de los cultivos sembrados en Boyacá



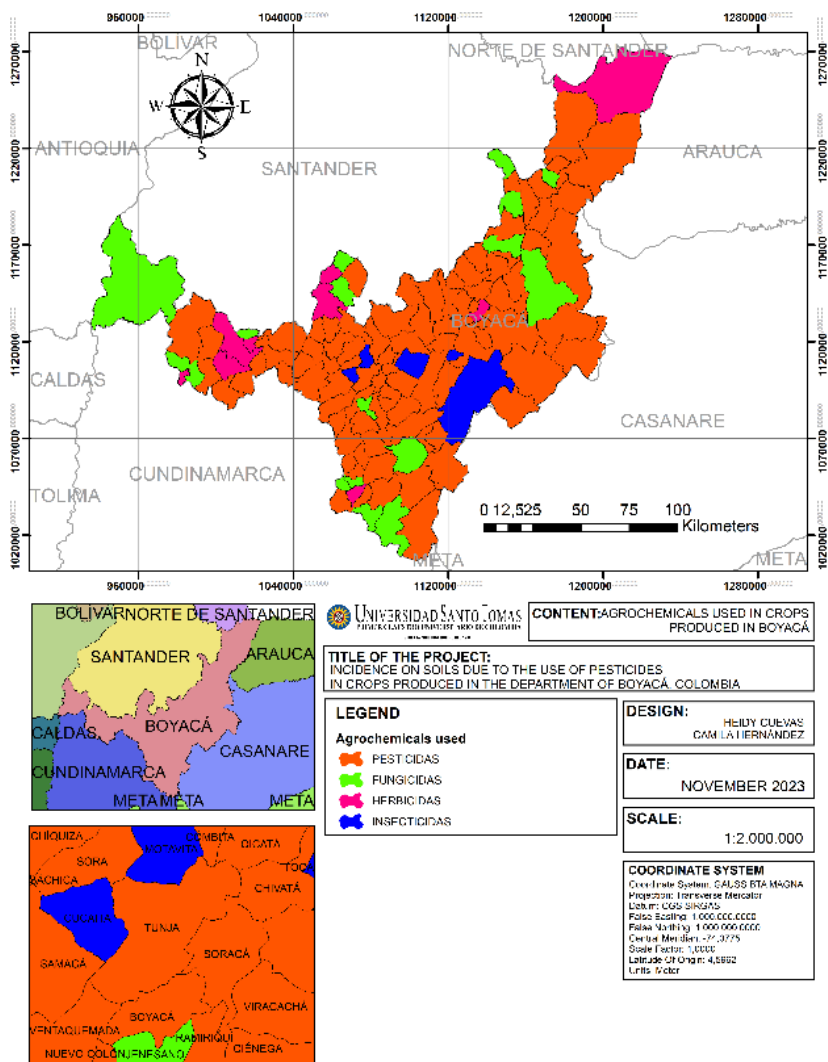
Fuente: Autores adaptado de
 “Evaluaciones Agropecuarias por Censo Departamento de Boyacá”

Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la producción de cultivos permanentes en el Departamento abarca 1.770.408 hectáreas, distribuidas en categorías como plantas medicinales, cultivos tropicales, frutales y oleaginosos. Los cultivos tropicales tradicionales, como cacao, café, caña miel, caña panelera, fique y tabaco lideran con una producción anual promedio de 1.552.469 hectáreas. En contraste, la producción más baja corresponde a cultivos para condimentos, bebidas medicinales y aromáticas, con un promedio anual de casi 196 toneladas en el departamento. Se destaca la prevalencia de la actividad pecuaria sobre la agrícola, con un predominio de los cultivos permanentes sobre los transitorios en Boyacá.

Por otra parte, el cultivo de papa en Colombia, especialmente en las regiones andinas de Boyacá, Cundinamarca y Nariño, demanda considerablemente el uso de fungicidas e insecticidas, principalmente aplicados por pequeños agricultores a través de pulverizadoras de mochila accionadas manualmente. Estos agricultores a menudo utilizan equipos de protección personal insuficientes o inadecuados, lo que incrementa los riesgos para la salud y el medio ambiente. (Feola & Binder, 2010)

La exposición excesiva a pesticidas, debido al manejo inadecuado y al uso desproporcionado, ha sido identificada como un problema significativo en Boyacá y sus alrededores, con posibles consecuencias adversas para la salud. Además, el uso excesivo de pesticidas plantea preocupaciones económicas debido a su impacto negativo en los costos de producción, representando alrededor del 14% de los costos totales para los pequeños agricultores. (Feola & Binder, 2010)

Ilustración 6. Agroquímicos empleados en los diferentes cultivos de Boyacá



Fuente: Autores adaptado de Datos Abiertos de la relación agrícola y de fertilizantes.

Por esta razón, es importante mejorar las prácticas agrícolas para lograr una transición hacia una producción agrícola más sostenible y eficiente en el uso de pesticidas. Se enfatiza la necesidad de comprender en profundidad los condicionantes de las decisiones de los agricultores, incluyendo aspectos socioeconómicos, conocimientos sobre alternativas, resistencia de plagas, coordinación entre agricultores, normas personales y percepción del riesgo. Este conocimiento profundo es esencial para diseñar intervenciones efectivas que fomenten prácticas agrícolas más sostenibles y un uso eficiente de los insumos, beneficiando tanto la salud y el medio ambiente como la economía de los pequeños agricultores. (Feola & Binder, 2010)

Conclusiones

El estudio realizado permite evidenciar que el uso de pesticidas en los diferentes cultivos sin importar cual sea, son activos destructores del suelo y subsuelo, no obstante, de manera directa es una amenaza irremediable para el agua tanto superficial como subterránea. Es así, como se demuestra que los efectos e impactos generados ponen en riesgo y peligro la calidad de los suelos, su productividad, la oportunidad de auto-regenerarse, ya que los químicos que hacen parte de estos agroquímicos tienen una alta concentración, y se desplazan hasta las capas más profundas, por tanto, son elevadamente tóxicos que destruyen los organismos que componen la tierra, alteran las características, su actividad biológica incidiendo puntualmente en conservar su condiciones y naturalidad.

De acuerdo a los análisis obtenidos, se hace necesario que las prácticas de producción agrícolas sean remplazadas con la inclusión de alternativas sostenibles, implementación de productos ecológicos, y en aquellos lugares donde ya están presentes los impactos de formas más severas se dé la ejecución de estrategias de fitorremediación mediante planes de remediación y

dinámicas de economía circular; ya que se hace eminente frente a la amenaza como es la persistencia, infiltración, saturación y contaminación latente a raíz del uso de estas sustancias letales para los ecosistemas.

Es de conocimiento de la importancia de las tierras para las despensas agrícolas y lo que estas representan principalmente para el desarrollo y conservación de la vida humana, ya que de estas dependen la disponibilidad del alimento, pero es también razonable que de la naturaleza de los suelos depende la calidad de los alimentos, y que de los productos utilizados para el control de plagas y enfermedades, también precisa la composición de cada alimento, y que los impactos que se generan son lamentablemente persistentes, lo cual quiere decir que algunos son inmediatos otros se dan a mediano y largo plazo, y no solo afecta el lugar en que se hace la aplicación si no que pueden llegar a otros territorios a través de escurrientías, flujos de aire, cuerpos de agua y animales, es así como no afecta solo el entorno, además de la exposición que tienen los seres humanos a estos.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

- Carbajal-Armenta, A., & Muñoz-Rojas, J. (2022). Sharing knowledge with farmers in the state of Puebla regarding the environmental impact derived from the use of agrochemicals. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/362760490>
- Camacho, W. R., & Alza, C. J. (2016). Risk estimate of water sources contamination of pesticides (Mancozeb and Carbofuran) in Ventaquemada, Boyacá - Colombia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(9), 514. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5514-9>
- Cecchetto, F. V. A., et al. (2023). Occurrence of chlorpyrifos and organochlorine pesticides in a native bumblebee (*Bombus pauloensis*) living under different land uses in the southeastern Pampas, Argentina. *Science of the Total Environment*, 902, 165093. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165093>
- Varela-Martínez, D. A., Acosta-Suárez, M. Á., Cárdenas, S. B., & Beltrán, M. (2019). High-throughput analysis of pesticides in minor tropical fruits from Colombia. *Food Chemistry*, 289, 664–672. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.03.076>
- Valbuena, D., & Camacho-Suárez, M. (2021). Agrochemical pesticide production, trade, and hazard: Narrowing the information gap in Colombia. *Journal of Environmental Management*, 285, 112123. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112123>
- Foela, G., & Binder, C. R. (2010). Identifying and investigating pesticide application types to promote a more sustainable pesticide use: The case of smallholders in Boyacá, Colombia. *Crop Protection*, 29(6), 612–622. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.01.008>

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura: La gestión de los sistemas en situación de riesgo. FAO. <https://www.fao.org/3/i1688s/i1688s.pdf>
- FAO. (2020). Los contaminantes agrícolas: una grave amenaza para el agua del planeta. FAO. <https://www.fao.org/news/story/es/item/1141818/icode/>
- FAO. (2021). Según la FAO y el PNUMA, el empeoramiento de la contaminación del suelo es una amenaza para la producción de alimentos y los ecosistemas en el futuro. FAO. <https://www.fao.org/news/story/es/item/1410485/icode/>
- Pierlot, F., et al. (2023). An indicator to assess risks on water and air of pesticide spraying in crop fields. *Science of the Total Environment*, 857, 159352. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159352>
- García-Santos, G., et al. (2016). Drift from the use of hand-held knapsack pesticide sprayers in Boyacá (Colombian Andes). *Science of the Total Environment*, 550, 703–710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.132>
- Navarro, L., et al. (2021). Assessment of the potential risk of leaching pesticides in agricultural soils: Study case Tibasosa, Boyacá, Colombia. *Heliyon*, 7(11), e08482. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08482>
- Tejeda-Benítez, L., et al. (2023). Pesticides in sediments from Magdalena River, Colombia, are linked to reproductive toxicity on *Caenorhabditis elegans*. *Chemosphere*, 345, 140633. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140633>
- Li, A. (2015). Residential surface soil guidance values applied worldwide to the original 2001 Stockholm Convention POP pesticides. *Journal of Environmental Management*, 159, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.05.038>

- Arias, L. A., et al. (2021). Environmental fate of pesticides in open field and greenhouse tomato production regions from Colombia. *Current Research in Environmental Sustainability*, 3, 100017. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2021.100017>
- Quintana-Mejía, M., et al. (2022). Identification of residues of organophosphorus and carbamate pesticides in serum samples of infants living in agricultural and fishing settings in Magangué, northern Colombia. *Toxicology*, 476, 153252. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2022.153252>
- Grondona, S. I., et al. (2023). Pesticides in aquifers from Latin America and the Caribbean. *Science of the Total Environment*, 905, 166055. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166055>

Capítulo

4

Estudio Hidroclimático de la cuenca del Nevado del Cocuy: Efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico del agua y el uso de suelos

Paula Andrea Daza Camelo ^a,
Paula Alejandra Caballero Arias^a,
Claudia Rocío Suárez Castillo^b

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

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



Resumen

El presente artículo tiene como objetivo llevar a cabo un estudio hidroclimático de la cuenca del Nevado del Cocuy, con el fin de analizar los efectos del cambio climático en el ciclo hidrológico del agua y el uso de suelos. Se pretende examinar la cobertura terrestre de la cuenca del Nevado del Cocuy para diagnosticar los posibles impactos generados por el fenómeno del Niño y la Niña. Para ello, se emplearon programas como *ArcGIS* y *Excel*, junto con datos abiertos del *IDEAM*, de los cuales se extrajo información climatológica correspondiente a un período de 20 años. Se realizó una selección de datos para los años considerados como húmedos, secos y moderados, con el objetivo de analizar las variables hidroclimáticas. Los resultados obtenidos indican que el Nevado del Cocuy es altamente sensible a las variaciones de temperatura, siendo posible identificar los años más húmedos (2010), secos (2016) y moderados (2007) en términos de precipitación en la cuenca. Estos resultados evidencian claramente la influencia del cambio climático en la zona. En lo que respecta a los tipos de suelos de la cuenca, se observa que estos favorecen actividades agrícolas como el cultivo de papa, trigo, cebada, maíz, frijol, haba y algunos frutales. Además, la actividad pecuaria está representada por el ganado bovino, ovino, caprino, equino, porcino y también la cría de peces.

Palabras clave: *Cambio climático, Cobertura terrestre, Estudio hidroclimático.*

Sumario

Este capítulo analiza los efectos del cambio climático sobre el ciclo hidrológico del agua y el uso del suelo. Se utilizaron datos climáticos del *IDEAM* y herramientas como *ArcGIS* y *Excel* para evaluar variables como precipitación, temperatura, humedad, viento, radiación solar y evapotranspiración en tres años representativos: seco (2016), moderado (2007) y húmedo (2010). Se evidenció una reducción del 40 % en las precipitaciones entre 2010 y 2016, afectando la oferta hídrica, biodiversidad, agricultura y abastecimiento de comunidades locales. La zona muestra alta sensibilidad a variaciones climáticas, con impactos más severos en las áreas rurales abastecidas por aguas de fusión glaciar. En cuanto al uso del suelo, predominan los bosques naturales, seguidos de rastrojos y cultivos de papa, así como pastos naturales y ganadería extensiva. Se concluye que el cambio climático ha modificado significativamente el comportamiento del ciclo hidrológico en la región, exigiendo estrategias de adaptación y gestión sostenible de los recursos naturales.

Introducción

La Sierra Nevada del Cocuy ubicado en Colombia, cubre alturas superiores a 4600 - 4700 m.s.n.m con más de 25 picos nevados, lo que subraya su gran importancia, llegando al punto de ser designado Parque Nacional El Cocuy. Sin embargo, la problemática ambiental que ha afectado la conservación de estas áreas ha aumentado debido a las crisis climáticas de los últimos años. Esta zona es crucial para el abastecimiento de comunidades enteras debido a la oferta hídrica proporcionada por el Nevado del Cocuy, ya que alimenta afluentes de los ríos Arauca, Casanare y Chicamocha, así como una variedad de fauna y flora (*MINAMBIENTE*, 2015).

En este artículo se presenta un estudio hidroclimático que considera las variables fundamentales: temperatura, precipitación, humedad, viento y brillo solar; realizando un análisis de diferentes períodos (años), con el fin de identificar patrones de comportamiento de años húmedos, secos y moderados. Asimismo, se destaca la relación entre estas variables y la oferta de agua en la cuenca, a partir del cálculo del balance hídrico, para lo cual se tuvo en cuenta adicional a las variables climáticas, los tipos y uso de suelo presentes en la zona de estudio.

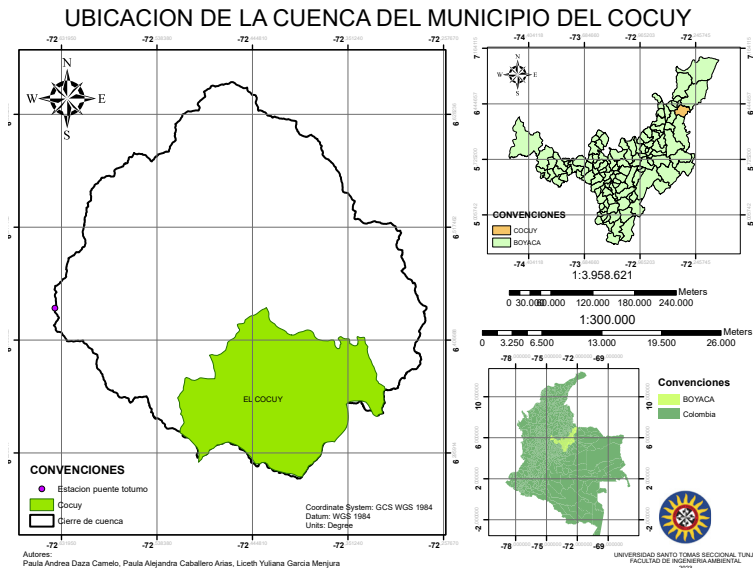
Metodología

El enfoque metodológico adoptado en este estudio es de tipo mixto, ya que combina los métodos cuantitativos y para obtener una visión más amplia y profunda del fenómeno de estudio. Los datos cuantitativos se obtienen de los datos abiertos del IDEAM y del IGAC, entidades oficiales encargadas de producir y difundir información cartográfica, climática y meteorológica de Colombia; para el análisis de los datos se utiliza el programa Excel, y el software de ArcGIS que permite codificar, categorizar y crear mapas temáticos que muestran la relación espacial entre las variables climáticas, meteorológicas y terrestres.

Zona de estudio

Generalidades del municipio del Cocuy

Ilustración 7. Ubicación de la Cuenca



Fuente: Propia.

- Geografía

El Cocuy es una formación montañosa localizada sobre el norte de la cordillera Oriental en el departamento de Boyacá. El punto más alto se encuentra en la cadena oriental, Ritacuba Blanco (5.410 msnm.) y Ritacuba Negro (5.340 m.). El Parque Nacional Natural El Cocuy, está ubicado al nororiente de la Cordillera Oriental de los Andes, entre los departamentos de Arauca, Boyacá y Casanare, tiene un área de 306.000 hectáreas. El Cocuy es también un municipio colombiano, capital de la Provincia de Gutiérrez, en el Departamento de Boyacá. La Sierra Nevada El Cocuy o Güicán se localiza alrededor de las coordenadas geográficas 6° 27 N y 72° 17 W.

- Economía

La economía de El Cocuy se basa principalmente en la agricultura, que aporta el 60 % del *PIB* municipal y emplea al 70 % de la población activa. Los cultivos más importantes son la papa, el trigo, la cebada, el maíz, el frijol, el haba y algunos frutales como la mora, la fresa y el durazno. Estos productos se destinan tanto al consumo local como a la comercialización en los mercados regionales y nacionales. La agricultura se practica en pequeñas parcelas, con técnicas tradicionales y orgánicas, y con un alto grado de asociatividad y cooperativismo entre los campesinos (mundial, 2023)

- Hidrografía

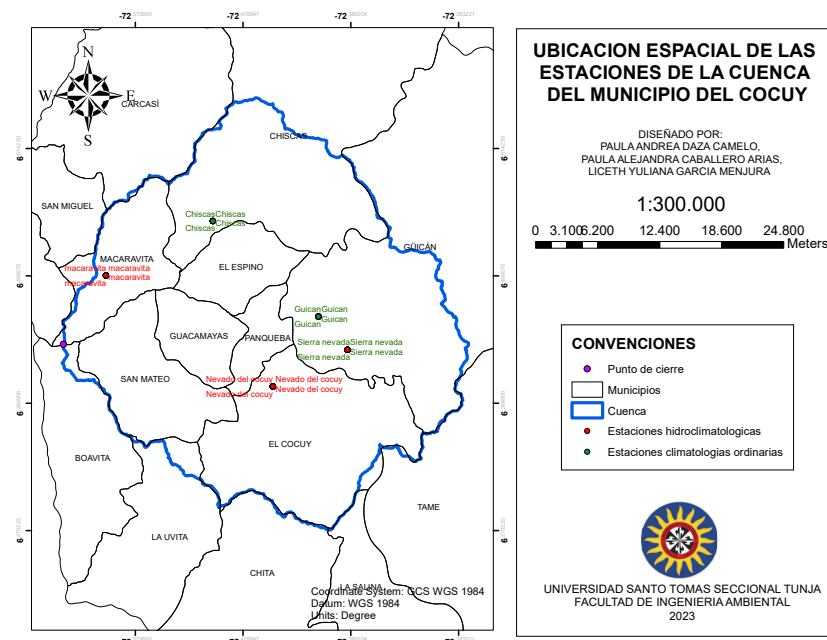
La cuenca del río Nevado drena gran parte del agua de fusión glaciar. En cuanto al abastecimiento hídrico, los centros urbanos ubicados en cercanías a la Sierra Nevada de El Cocuy ubican sus bocatomas sobre drenajes que nacen en el páramo o menores alturas, sin relación con el agua superficial de fusión glaciar. Sin embargo, las comunidades rurales ubicadas en la parte alta de la cuenca del río Nevado localizan sus sistemas de abastecimiento

sobre los drenajes que se desprenden directamente de la fusión glaciario, en ocasiones construyendo puntos de captación en alturas superiores a los 4000 m.s.n.m; seguramente las bocatomas más altas del país. La densidad de población, el fraccionamiento de la propiedad, la percepción de pureza y cantidad del agua del glaciario, son los principales estructurantes de esta relación directa entre comunidades y aguas superficiales de fusión glaciario.

Resultados

Análisis de los factores climáticos en el municipio del Cocuy

Ilustración 8. Ubicación espacial de las estaciones hidroclimatológicas de la cuenca



Fuente: Propia.

- Precipitación y temperatura

El análisis de los factores climáticos se realizó mediante tres estaciones que contenían datos de precipitación (Sierra nevada, Macaravita y Nevado del Cocuy) y tres estaciones que registran datos de temperatura (Sierra nevada, Chiscas y Güicán). Se seleccionaron 3 años significativos: el seco 2016, el moderado 2007 y el 2010. A continuación, se realizó el análisis de los datos por estaciones.

Estaciones

- Estación Sierra Nevada

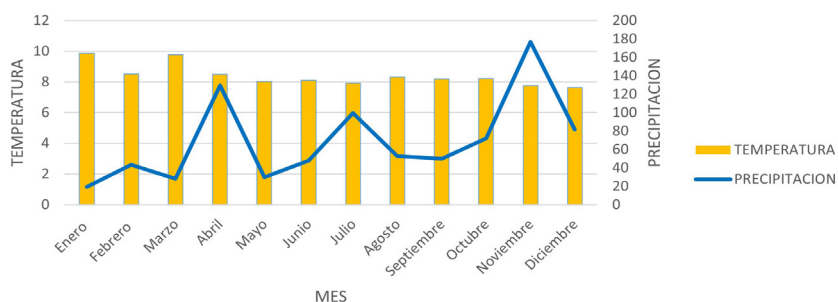
Ilustración 9. Precipitación y temperatura de la estación Sierra Nevada

SIERRA NEVADA								
2016			2007			2010		
DATOS HISTOGRAMA AÑO MÁS CALIDO			DATOS HISTOGRAMA AÑO MODERADO			DATOS HISTOGRAMA AÑO MÁS HUMEDO		
MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN
Enero	9,84	19	Enero	8,68	17	Enero	9,93	4
Febrero	8,49	43	Febrero	8,42	0	Febrero	10,73	30
Marzo	9,74	28	Marzo	7,75	0	Marzo	10,8	13
Abril	8,47	130	Abril	7,6	35	Abril	9,08	160
Mayo	8	30	Mayo	7,84	151	Mayo	8,64	214
Junio	8,06	48	Junio	7,7	75	Junio	8,38	149
Julio	7,9	100	Julio	7,4	62	Julio	7,49	217
Agosto	8,28	53	Agosto	7,75	109	Agosto	7,5	106
Septiembre	8,17	50	Septiembre	7,72	103	Septiembre	6,86	215
Octubre	8,18	72	Octubre	7,38	192	Octubre	6,88	203
Noviembre	7,73	177	Noviembre	7,63	109	Noviembre	8,27	164
Diciembre	7,59	81	Diciembre	7,73	85	Diciembre	8,98	59
Anual	8,37	830,35	Anual	7,80	938,30	Anual	8,63	1532,70

Fuente: Propia.

Año cálido

Ilustración 10. Climograma año seco Sierra Nevada (2016)

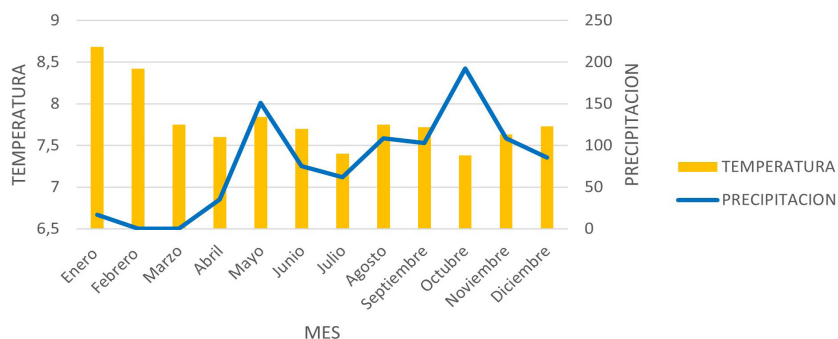


Fuente: Propia.

De acuerdo con la *figura 3* y la *tabla 1* es posible afirmar que en el año 2016 en la estación de sierra nevada se presentó una precipitación abundante ya que la precipitación anual es de 830 mm, también podemos observar que el mes más lluvioso fue noviembre con una precipitación de 177 mm/mes y se registró una temperatura promedio de 8,37 °C.

Año moderado

Ilustración 11. Climograma año moderado Sierra Nevada (2007)

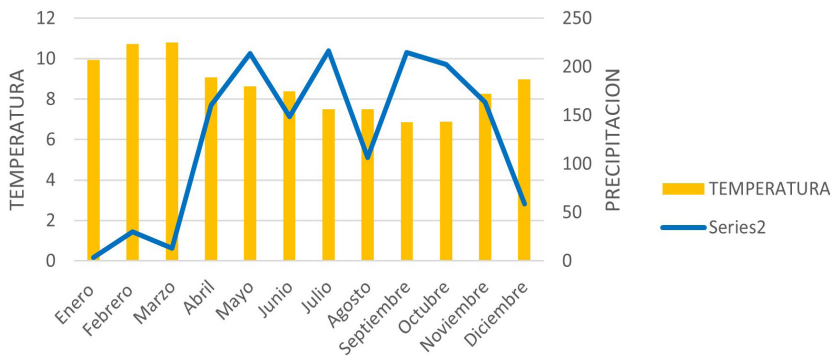


Fuente: Propia.

La *figura 4* nos muestra que en el año moderado 2007 moderado en la estación sierra nevada la temperatura promedio anual era menor en 0,57 °C en comparación con el año más seco, respecto de la precipitación se puede evidenciar un aumento de aproximadamente de 100 mm/año clasificando una precipitación anual muy abundante. Por otra parte, también cabe resaltar que octubre fue el mes con mayor precipitación con 192 mm y el mes con la menor temperatura.

Año húmedo

Ilustración 12. Climograma año húmedo Sierra Nevada (2010)



Fuente: Propia.

El climograma de la *figura 5* presenta una precipitación anual de 1535 mm, por lo tanto, las podemos considerar muy abundantes y es considerado el año más húmedo de una serie de 20 años anteriores. Se evidencio que los meses más lluviosos fueron mayo, julio y septiembre), en cuanto a la temperatura la *tabla 1* muestra una media anual de 8,26 °C y el mes que registró la temperatura más baja fue la del mes de octubre y la más alta la del mes de marzo.

- Estación Nevado – Güicán

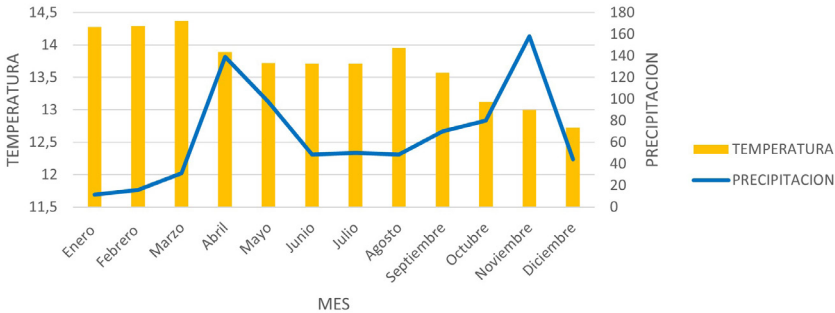
Tabla 7. Precipitación y temperatura de la estación Nevado – Güicán

NEVADO - GUICAN								
2016			2007			2010		
DATOS HISTOGRAMA AÑO MAS CALIDO			DATOS HISTOGRAMA AÑO MODERADO			DATOS HISTOGRAMA AÑO MAS HUMEDO		
MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN
Enero	14,28	12	Enero	13,44	50	Enero	14,76	0
Febrero	14,29	16	Febrero	13,34	0	Febrero	15,09	36
Marzo	14,37	31	Marzo	13,68	67	Marzo	15,21	22
Abril	13,89	139	Abril	13,26	74	Abril	13,49	225
Mayo	13,72	98	Mayo	13,47	142	Mayo	13,48	153
Junio	13,71	49	Junio	12,86	46	Junio	13,18	100
Julio	13,71	50	Julio	12,92	49	Julio	12,77	156
Agosto	13,95	49	Agosto	12,29	144	Agosto	12,42	71
Septiembre	13,57	70	Septiembre	12,23	62	Septiembre	12,74	194
Octubre	13,12	80	Octubre	12,14	143	Octubre	13,19	112
Noviembre	13	158	Noviembre	13	55	Noviembre	12,91	128
Diciembre	12,72	44	Diciembre	12,4	75	Diciembre	13,54	121
Anual	13,69	794,30	Anual	12,92	906,20	Anual	13,57	1316,80

Fuente: Propia.

Año cálido

Ilustración 13. Climograma año seco Nevado - Güicán (2016)



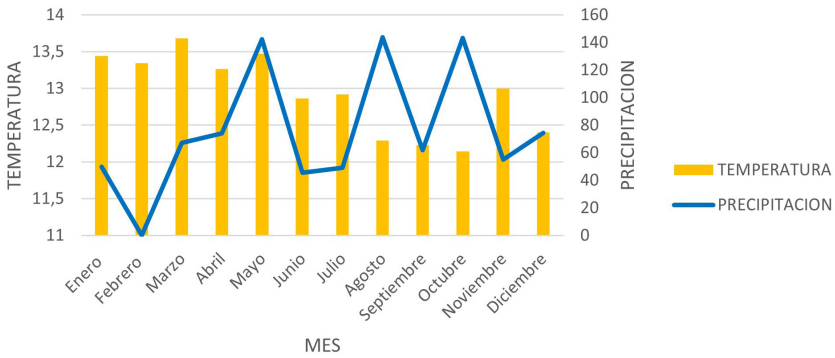
Fuente: Propia.

Basándose en la figura 6 que indica las variables climáticas de la estación del nevado del Cocuy del año más seco, la precipitación anual fue de 794,3 mm, la más baja que se presentó en los años de estudio. Esta precipitación se considera escasa para el clima de la zona, que tiene una media de 1000 mm. Los meses más lluviosos fueron abril y noviembre, con más de 120 mm, mientras que el

mes más seco fue enero, con menos de 20 mm. De acuerdo a la temperatura anual promedio, este año se registró 13 °C. Por lo tanto, se recomienda el uso de riego, el manejo de la siembra y la cosecha, y la selección de variedades adaptadas al clima de la zona.

Año moderado

Ilustración 14. Climograma año moderado Nevado - Güicán (2007)

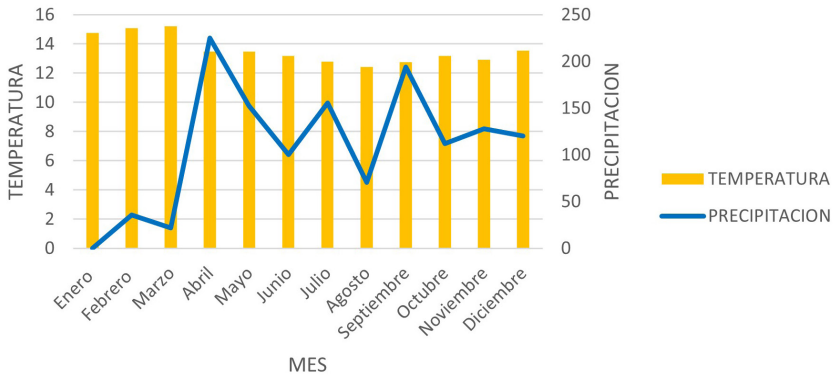


Fuente: Propia.

Al observar el climograma del año moderado y la *tabla 2* de la estación del nevado del Cocuy y Güicán, se puede notar que la temperatura promedio anual es de 12°C, lo cual se considera fresco. Además, la precipitación anual es de 906 mm, siendo agosto el mes más lluvioso con 142 mm y el mes más cálido fue marzo con una temperatura de 13°C.

Año húmedo

Ilustración 15. Climograma año húmedo Nevado - Güicán (2010)



Fuente: Propia.

De acuerdo con la *figura 8* es posible analizar que las precipitaciones totales anuales son de 1316 mm, por lo tanto, podemos considerar que son muy abundantes. El mes más lluvioso fue abril con 225 mm y el mes con temperaturas más altas fue marzo con 15°C.

- Estación Macaravita – Chiscas

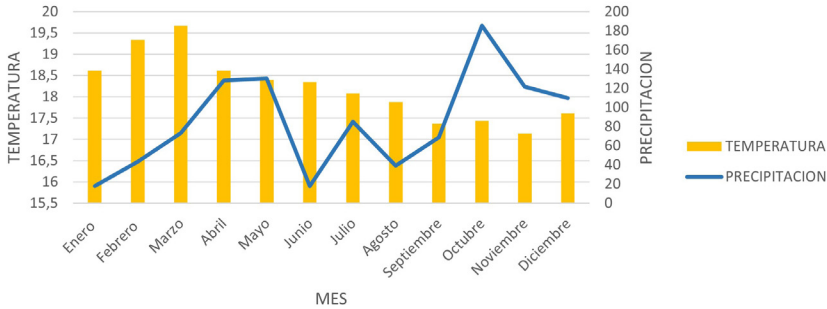
Tabla 8. Precipitación y temperatura de la estación Macaravita – Chiscas

MACARAVITA - CHISCAS								
2016			2007			2010		
DATOS HISTOGRAMA AÑO MÁS CALIDO			DATOS HISTOGRAMA AÑO MODERADO			DATOS HISTOGRAMA AÑO MÁS HUMEDO		
MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN	MES	TEMPERATURA	PRECIPITACIÓN
Enero	18,62	18	Enero	17,72	71	Enero	17,79	0
Febrero	19,34	43	Febrero	17,23	0	Febrero	18,61	10
Marzo	19,67	73	Marzo	17,47	113	Marzo	18,69	57
Abril	18,62	128	Abril	17,62	105	Abril	17,38	133
Mayo	18,39	130	Mayo	17,08	165	Mayo	17,57	57
Junio	18,35	18	Junio	16,75	83	Junio	16,79	188
Julio	18,08	85	Julio	16,94	83	Julio	16,15	162
Agosto	17,88	39	Agosto	16,33	49	Agosto	16,64	125
Septiembre	17,37	69	Septiembre	16,84	56	Septiembre	16,05	165
Octubre	17,43	186	Octubre	16,43	175	Octubre	16,46	137
Noviembre	17,14	122	Noviembre	16,53	61	Noviembre	15,98	188
Diciembre	17,61	110	Diciembre	15,55	57	Diciembre	15,93	70
Anual	18,21	1020,40	Anual	16,87	1019,08	Anual	17,00	1291,20

Fuente: Propia.

Año cálido

Ilustración 16. Climograma año seco Macaravita – Chiscas (2016)

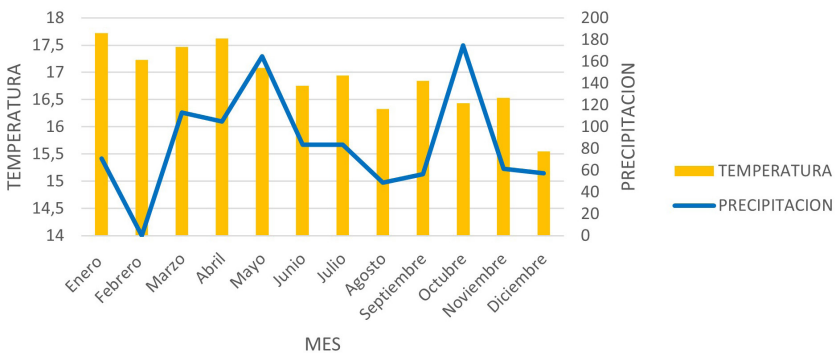


Fuente: Propia.

La figura 9 muestra las precipitaciones más altas registradas durante el año más seco de la revisión. Es importante destacar que el municipio de Macaravita presenta abundantes precipitaciones que benefician los cultivos de la zona. En cuanto a la temperatura, se mantuvo constante durante todo el año, excepto en marzo con una temperatura de 19°C. La temperatura promedio anual fue de 18°C.

Año moderado

Ilustración 17. Climograma año moderado Macaravita – Chiscas (2007)

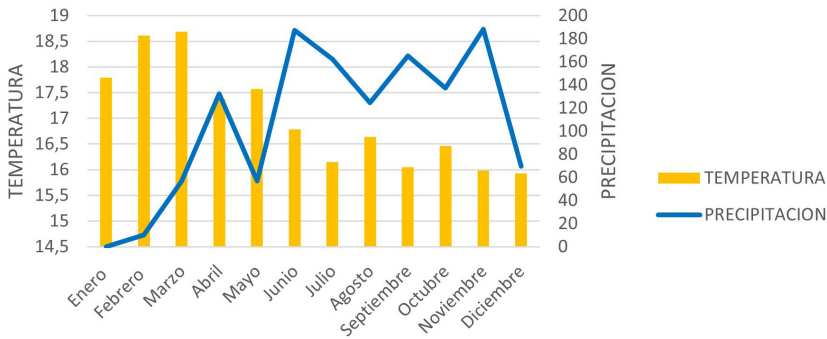


Fuente: Propia.

De acuerdo con la *figura 10* y la *tabla 3* es posible afirmar que en 2007 en la estación de Macaravita - Chiscas presentó una precipitación similar a la del año seco ya que la precipitación anual es de 1019 mm, también podemos observar que el mes más lluvioso fue octubre con una precipitación de 175 mm / mes y se registró una temperatura promedio de 16°C.

Año húmedo

Ilustración 18. Climograma año húmedo Macaravita – Chiscas (2010)



Fuente: Propia.

El climograma de la *figura 11* muestra una precipitación anual de 1291 mm, considerada muy abundante. Los meses más lluviosos fueron junio, septiembre y noviembre, mientras que mayo fue el menos lluvioso con menos de 60 mm. En cuanto a la temperatura, la *tabla 3* indica una media anual de 17 °C. Diciembre registró la temperatura más baja y marzo la más alta.

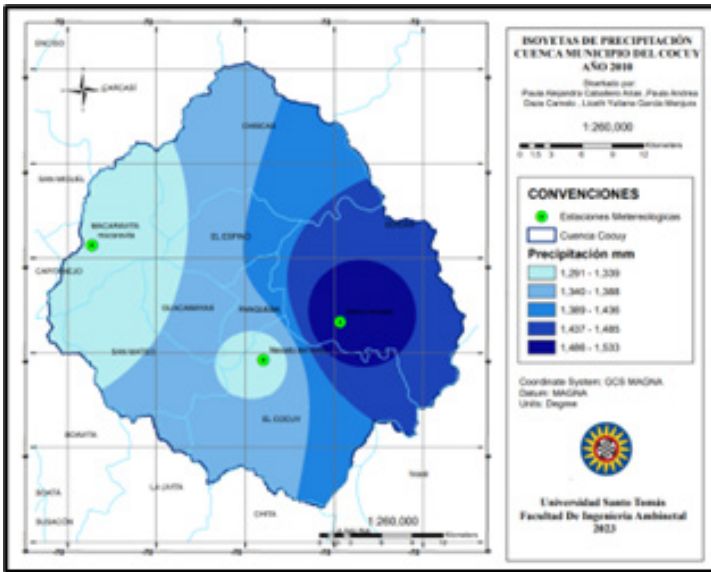
Isoyetas

Una *isoyeta* es una línea imaginaria que conecta puntos en un mapa o gráfico, que producen la misma cantidad de precipitación en un periodo de tiempo determinado (meteoclim, 2022) sirven para representar y analizar la distribución espacial y temporal de

las precipitaciones, que son un factor importante para el clima, la hidrología, la agricultura y la ecología. Con las isoyetas se pueden identificar las zonas más húmedas y secas, las estaciones más lluviosas y secas, y las variaciones y tendencias de las precipitaciones a lo largo del tiempo (*Losporques, 2023*).

Año húmedo

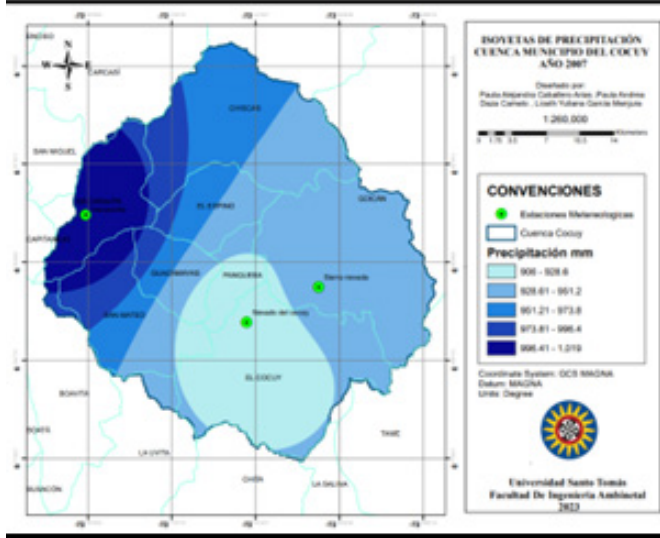
Ilustración 19. Isoyetas del año húmedo



Fuente: Propia.

Año moderado

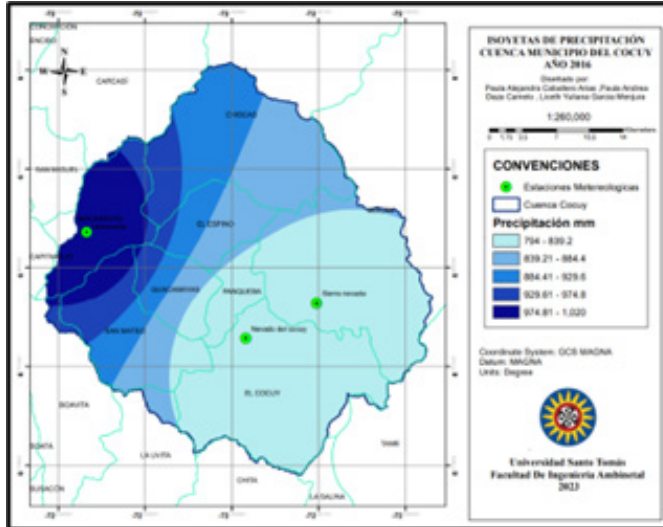
Ilustración 20. Isoyetas del año moderado



Fuente: Propia.

Año seco

Ilustración 21. Isoyetas del año seco



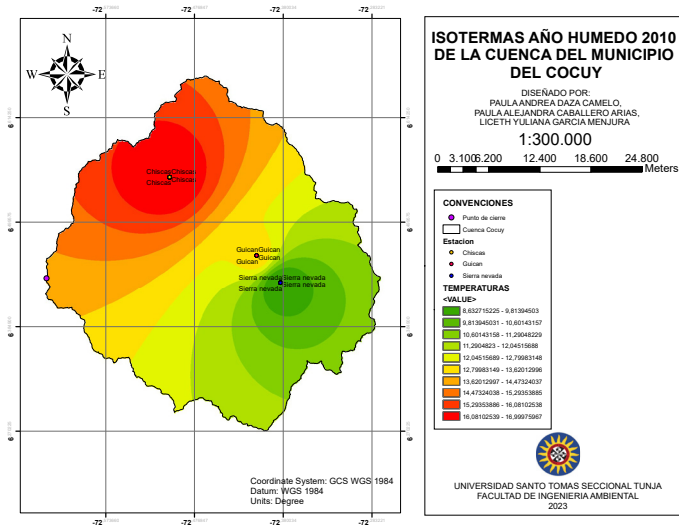
Fuente: Propia.

Isotermas

Una *isoterma* es una línea imaginaria que conecta puntos en un mapa o gráfico que tienen la misma temperatura en un periodo de tiempo determinado. Las isotermas sirven para representar y analizar la distribución espacial y temporal de las temperaturas, que son un factor importante para el clima, la biogeografía, la agricultura y la ecología. Con las isotermas se pueden identificar las zonas más cálidas y frías, las estaciones más cálidas y frías, y las variaciones y tendencias de las temperaturas a lo largo del tiempo. (Prefire, 2013)

Año húmedo

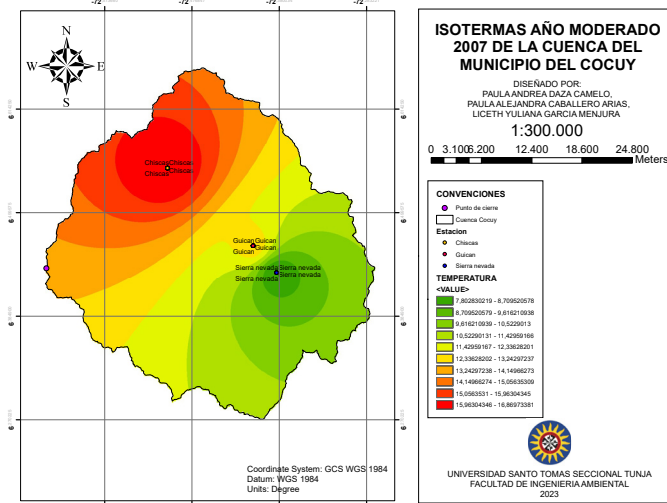
Ilustración 22. Isotermas del año húmedo



Fuente: Propia.

Año moderado

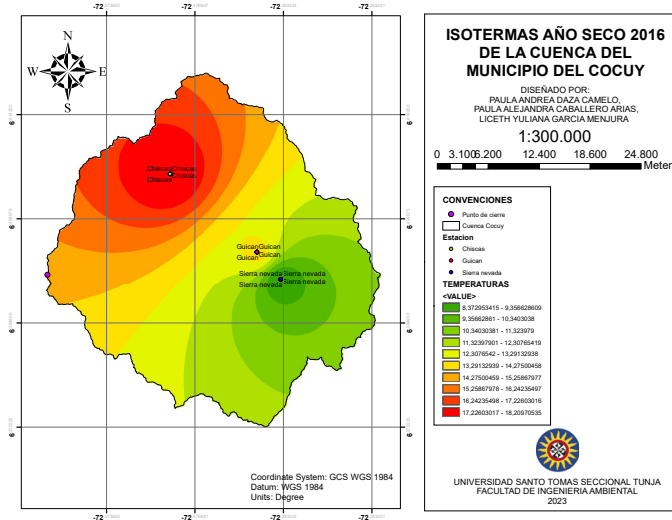
Ilustración 23. Isotermas del año moderado



Fuente: Propia.

Año seco

Ilustración 24. Isotermas del año seco



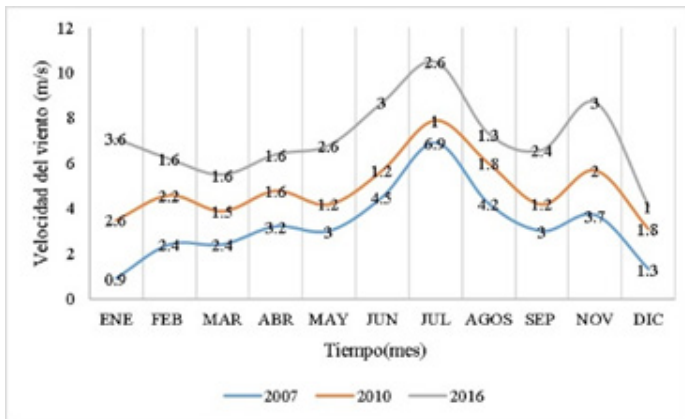
Fuente: Propia.

Velocidad y dirección de los vientos

Velocidad del viento en superficie

Con relación a los valores de velocidad de viento, se puede concluir que, de acuerdo con la clasificación de *Beaufort*, para el mes de enero con un valor mínimo de 0.9 m/s, se encuentra en la escala 1 (Ventolina) la cual se encuentra de 0.3 – 1.5 m/s y hace referencia a la dirección del viento la cual se revela por el movimiento del humo, pero no por las veletas. En el caso de la velocidad más alta que se presentó en 2007 (moderado), y se encuentra en la escala 4 (Brisa moderada), la cual enfatiza que el viento levanta polvo y hojas de papel, ramas agitadas. Para los demás valores que están entre 3.4-5.4 m/s se encuentran en la clasificación 3 (brisa débil), es decir que hojas y ramas agitadas constantemente; el viento despliega las banderolas. (IDEAM I. d., 2017)

Ilustración 25. Velocidad del viento estación Sierra Nevada



Fuente: Propia.

Viento

El viento, en general, puede llegar a valores altos de velocidad, los cuales oscilan entre 0 y más de 20 m/s (72 km/h). Sus mayores valores se presentan al anochecer y al amanecer, cuando son más

notorias las diferencias térmicas locales relacionadas con la radiación solar.

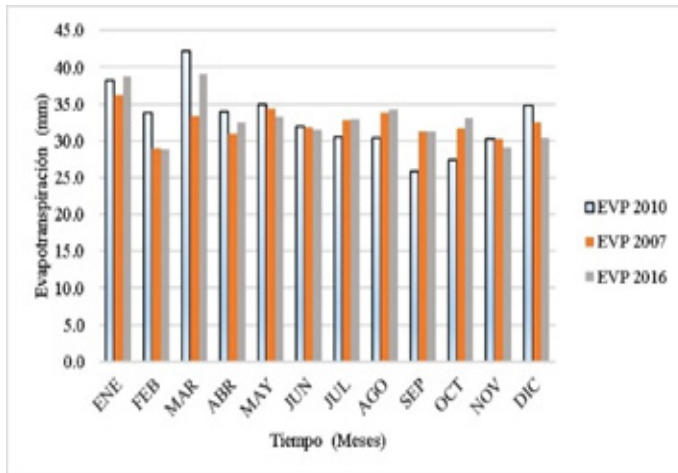
Vientos locales

Un viento local es una corriente de aire que se produce en un área local específica de manera predecible. Pueden ser distancias de decenas o incluso cientos de kilómetros. Si la escala se vuelve demasiado grande, los vientos ya no son locales sino globales.

Clasificación climática

Thornthwaite

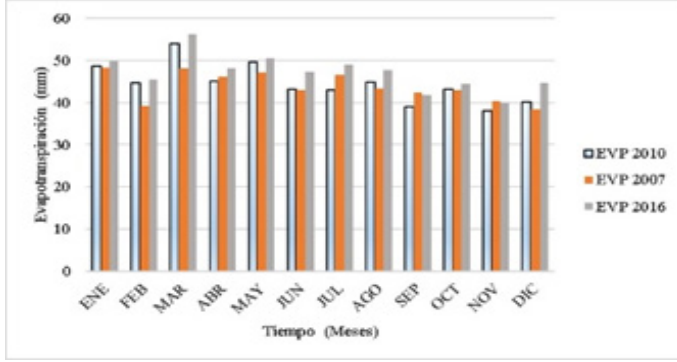
Ilustración 26. Evapotranspiración estación Sierra Nevada



Fuente: Propia.

En la *figura 19* se evidencia que en 2010, es decir para el año húmedo hay una mayor evapotranspiración en el mes de marzo en la cuenca de estudio, que puede estar relacionado con las diferentes variables climatológicas como temperatura y la precipitación.

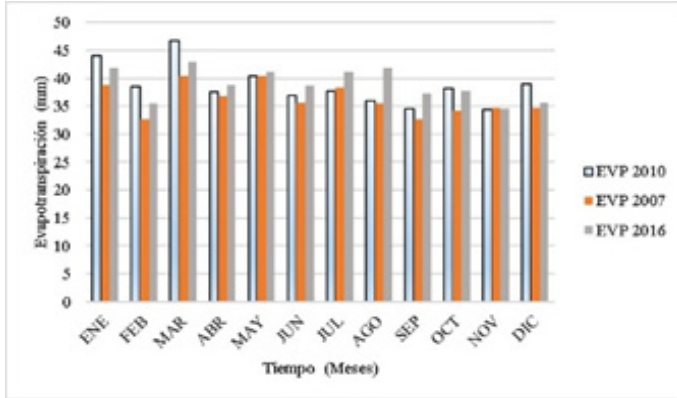
Ilustración 27. Evapotranspiración estación Macaravita – Chiscas



Fuente: Propia.

Como se muestra en la *Figura 20* el valor máximo de evapotranspiración se presenta en el mes de marzo en el año 2010, esto puede estar relacionado a la temperatura, ya que para estos mismos años la temperatura fue de 18.61°C Tabla, con relación al valor mínimo se presentó en el mes de noviembre, coyuntura donde la temperatura fue de 15.98 °C.

Ilustración 28. Evapotranspiración estación Nevado – Güicán



Fuente: Propia.

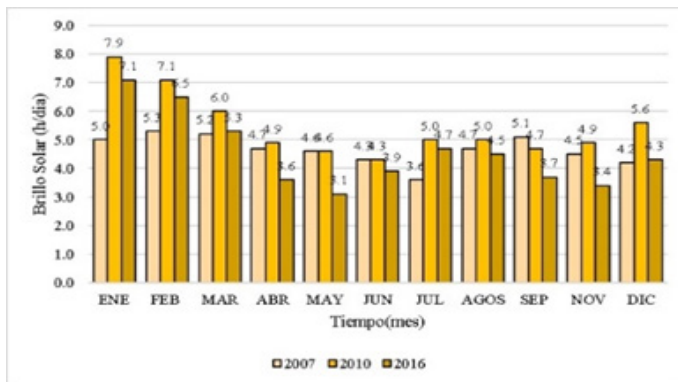
Para la estación climatológica de Güicán la evapotranspiración mayor se presentó en el mes de marzo en el año 2010, esto se pudo deber a la ubicación de esta, ya que se encuentra cerca al

nevado del cocuy, lo que variables como brillo solar o temperatura deben estar relacionadas a que haya mayor evapotranspiración. Teniendo en cuenta que la temperatura correspondiente fue de 15, 21°C resaltando que es uno de los valores más altos presentes en dicha estación.

Brillo Solar

El brillo solar es también conocido como insolación y corresponde al número de horas de radiación directa, este valor varía dependiendo de la nubosidad, la exposición de la ladera y la expansión del horizonte.

Ilustración 29. Brillo solar Estación Sierra Nevada



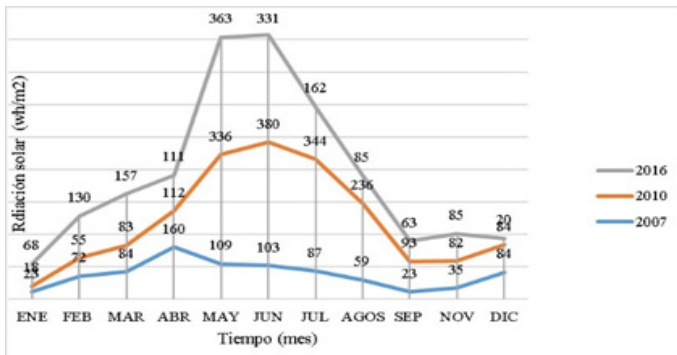
Fuente: Propia.

De acuerdo con la gráfica correspondiente al brillo solar, se evidencia que el año seco presenta los valores más bajos, puesto que en enero alcanzó a llegar a 3.1 h/día de brillo solar en comparación con el año 2010 que corresponde al año húmedo el cual su valor más alto fue de 7.9 h /día.

Radiación solar

Como se aprecia en la gráfica, la radiación solar en el lugar de estudio presenta un comportamiento muy particular debido a la variación de los factores climáticos característicos de la zona, donde el valor más alto presente en la cuenca fue de 363 wh / m² en el mes de mayo de 2016, que representa el año seco. Por el contrario, 2007 presentó rangos de radiación de 23 wh / m² a 160 wh / m², contexto donde el valor mínimo fue de 18 wh / m² en el mes de enero. Estos datos fueron tomados de la estación Sierra Nevada, la cual está ubicada cerca al nevado del Cocuy, lo que quiere decir que no debería presentar valores muy altos en temas de radiación.

Ilustración 30. Radiación solar estación Sierra Nevada



Fuente: Propia.

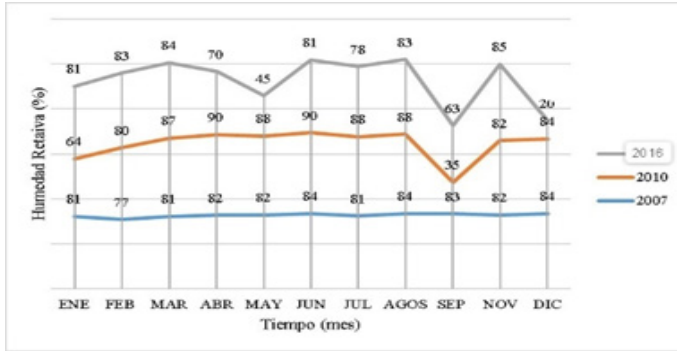
Humedad relativa

Estación Sierra Nevada

A partir de la gráfica de humedad relativa, donde el valor máximo es de 85 % en el mes de septiembre para 2016, que corresponde al total de vapor que podría ser contenido el aire a una temperatura de 7°C, en el caso del valor mínimo se presentó en 2010 con 35% y en el mes de septiembre este es el dato más bajo de todos los años.

Como se evidencia en la gráfica el año que tuvo humedades más estables fue 2007, donde estas variaron entre el 77 % y 84% en comparación a los demás años que tuvieron picos más altos, o por el contrario más bajos.

Ilustración 31. Humedad relativa estación Sierra Nevada



Fuente: Propia.

Evaporación

La evaporación es el proceso por el cual el agua pasa de la fase líquida a la fase gaseosa, mientras que el proceso regresa a la atmósfera en forma de vapor. La evaporación depende directamente de la temperatura y la humedad relativa. El comportamiento de la evaporación en el municipio de El Cocuy oscila entre 100 mm / año y 900 mm / año. Los años en los que el Niño fue predominante los valores de evaporación anual son altos y en la niña son bajos. El comportamiento multianual de la evaporación en el municipio de El Cocuy se presenta en el mes de mayo como el más bajo y corresponde a un valor de 50 mm. Los valores de evaporación acumulada son relativamente constantes entre los meses de abril y noviembre, y aumentan en los meses de diciembre y enero.

Tabla 9. Evaporación de la cuenca del Cocuy

Característica	Mínima	Máxima
Evaporación (mm/año)	50	85

Fuente: Propia.

Uso de Suelos

Se describen los usos del suelo de la cuenca del río nevado, basándonos en los datos del IGAC. El uso del suelo principal de la cuenca es el bosque natural, que ocupa un área de 695 km². Este uso del suelo se caracteriza por tener una alta biodiversidad, una alta capacidad de infiltración y una baja erosión. El bosque natural se encuentra principalmente en las zonas altas y medias de la cuenca, donde las precipitaciones son más abundantes y las temperaturas son más bajas. (IGAC, 2011)

El segundo uso del suelo más importante de la cuenca es el rastrojo, este se refiere a la vegetación secundaria que crece después de la tala o el abandono de los cultivos. El rastrojo tiene una menor biodiversidad, una menor capacidad de infiltración y una mayor erosión que el bosque natural. El rastrojo se encuentra principalmente en las zonas bajas y medias de la cuenca, donde las precipitaciones son más escasas y las temperaturas son más altas.

El tercer uso del suelo más relevante de la cuenca es el cultivo de papa que es el principal producto agrícola de la región. El cultivo de papa tiene una alta demanda de agua, una alta fertilización y una alta rotación. El cultivo de papa se encuentra principalmente en las zonas medias y altas de la cuenca, donde el suelo es más fértil y el clima es más favorable. (IGAC, 2011)

Los otros usos del suelo de la cuenca son los siguientes:

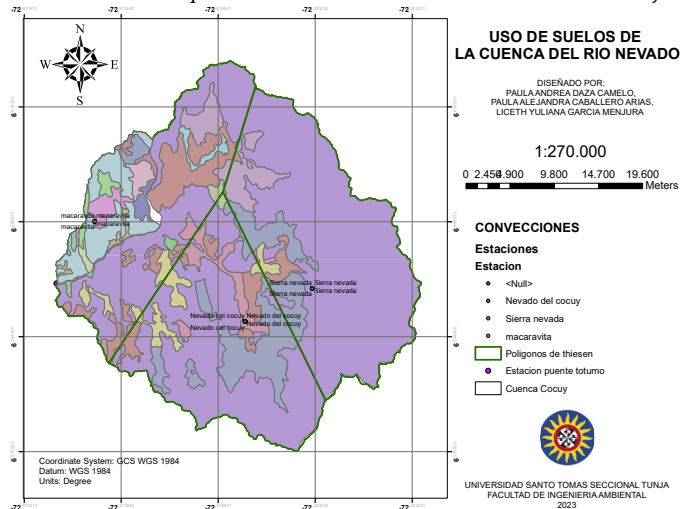
- Pastos naturales, estos crecen de forma natural y que se usan para la ganadería extensiva. Los pastos naturales tienen una baja productividad, una baja calidad y diversidad.
- Cultivos de subsistencia como lo son el maíz, yuca, frijol, piña, trigo, cebada, arveja y frijol, que se usan para el autoconsumo de las familias campesinas.
- Ganadería extensiva con pastos manejados, se realiza con pastos mejorados, como el kikuyo, que se

siembran y se fertilizan. La ganadería extensiva con pastos manejados tiene una mayor productividad, una mayor calidad y diversidad.

- Cultivos de caña de azúcar, tabaco y maíz, este uso del suelo se refiere a los cultivos comerciales que se usan para la producción de panela, cigarrillos y alimentos.
- Cultivos forestales de árboles que se usan para la producción de madera, leña y frutos. Se encuentran principalmente en las zonas altas de la cuenca, donde el suelo es más profundo y el clima es más frío.

Sin uso agrícola, como las rocas, los glaciares, los ríos y los lagos. Estas zonas tienen una baja biodiversidad, una baja capacidad de infiltración y una alta erosión. Estas zonas se encuentran principalmente en las zonas altas de la cuenca, donde el suelo es más escaso y el clima es más extremo. (IGAC, 2011)

Ilustración 32. Mapa uso de suelos de la cuenca del nevado del Cocuy



Fuente: Propia.

Conclusiones

En conclusión, basándonos en la clasificación y el análisis de las variables climáticas (precipitación, temperatura, brillo solar, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar) de la cuenca del nevado del Cocuy, podemos afirmar que el año más seco registrado en 20 años fue el 2016, ya que presentó los niveles más bajos de precipitación. Además, determinamos el año moderado, que fue el 2007, con precipitaciones medias de 1000 mm / año. Por último, identificamos el año húmedo, que fue el 2010, el cual fue de precipitaciones abundantes.

Por otra parte, la velocidad del viento, según la escala de *Beaufort*, alcanzó su máximo en 2007 con una clasificación moderada (Escala 4 - Brisa moderada). Los valores restantes, que se encuentran entre 3.4-5.4 m / s, corresponden a la clasificación 3 (Brisa débil), lo que significa que las hojas y ramitas se agitan constantemente y el viento despliega las banderolas.

Se abordó el tema del impacto del cambio climático sobre el ciclo hidrológico del agua en la cuenca del nevado del Cocuy, y se evidenció que esta zona ha sufrido una variación significativa de las precipitaciones, que se redujeron en un 40% -desde el año húmedo 2010 hasta el año seco 2016-... Este fenómeno afecta la disponibilidad y la calidad del recurso hídrico, así como la biodiversidad y la vegetación de la zona en estudio afectando la agricultura, las áreas protegidas y el abastecimiento hídrico de la población.

La cobertura terrestre de la cuenca del nevado del Cocuy cuenta con diversos usos de suelos en los que priman los Bosques naturales que se encuentra principalmente en las zonas altas y medias de la cuenca, donde las precipitaciones son más abundantes y las temperaturas son más bajas; también encontramos rastrojos, pastos naturales, cultivos subsistencia y ganadería extensiva con pastos manejados.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

Blog.com. (2022). Humedad relativa, específica y absoluta [incluye carta psicométrica]. Soler & Palau. <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/humedad-relativa-especifica-absoluta/>

Concepto.de. (2013). Humedad. <https://concepto.de/humedad/>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2023). Catálogo de estaciones. <https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Catalogo-Estaciones-IDEAM/n6vw-vkfe>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2013). Aguas superficiales. <http://www.ideam.gov.co/web/agua/aguas-superficiales>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2017). Atlas de viento de Colombia. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2013). Características de la radiación solar. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar#:~:text=La%20radiaci%C3%B3n%20solar%20es%20la,emitida%20por%20la%20superficie%20solar>

Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC]. (2011). Cartografía. <https://www.igac.gov.co/>

Los Porqués. (2023). ¿Qué son las isotermas, las isobaras y las isohietas? <https://www.losporques.com/meteorologia/que-son-las-isotermas-las-isobaras-y-las-isohietas.htm>

Meteoclim. (2022). Términos peculiares en meteorología. <https://blog.meteoclim.com/terminos-peculiares-meteorologia-iv>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MinAmbiente]. (2015). El Cocuy. <https://www.minambiente.gov.co/>

Banco Mundial. (2023, marzo 31). Panorama general: Agricultura. <https://www.bancomundial.org/es/topic/agriculture/overview>

Prefire. (2013). Prefire innovation hub. <https://www.prefire.es/hub/2012/02/conoce-que-es-una-isoterma-2/>

Significados.com. (2013). ¿Qué es el viento? <https://www.significados.com/viento/#:~:text=El%20viento%20es%20el%20movimiento,el%20clima%20en%20la%20Tierra>

Significados.com. (2023, noviembre 30). Presión atmosférica. <https://www.significados.com/presion-atmosferica/>

Capítulo

5

Análisis de la presencia de contaminantes emergentes en agua para consumo humano y sus alternativas de remoción

Paola Rodríguez-Saldarriaga ^a,
Yudy Andrea Londoño-Cañas ^a,
Gustavo A. Peñuela ^a

^a *Universidad de Antioquia, Facultad de ingeniería, Sede de investigación universitaria (SIU).
Grupo de diagnóstico y control de la contaminación (GDCON), Medellín, Colombia.*



Resumen

Una de las problemáticas actuales en el área de recursos hídricos es la contaminación debida a fármacos en el medio ambiente, esto debido a los impactos que estos generan a la salud humana. El agua destinada para el consumo humano es de gran importancia para la comunidad. No obstante, el aumento en el consumo de los fármacos, principalmente de antibióticos, ha generado una gran preocupación debido a su presencia en las fuentes de captación de agua. y consecuentemente, en las plantas de potabilización, lo cual puede advertir una ingesta involuntaria de fármacos a través del agua potable, debido a la poca eficiencia de estos procesos en su remoción. Investigaciones recientes reportan la ineficiencia de los procesos convencionales de potabilización de agua como la coagulación, floculación, filtración y desinfección en la remoción de antibióticos, lo que ha llevado a muchos investigadores a evaluar tecnologías alternativas como los procesos avanzados de oxidación para lograr removerlos del agua potable. Dichos procesos, presentan unas ventajas y desventajas dentro de la utilización a gran escala debido a que, a pesar de ser muy eficientes, tienen generalmente un alto costo.

Palabras clave: *Contaminantes emergentes, fármacos, antibióticos, potabilización, procesos avanzados de oxidación.*

Introducción

La problemática ambiental derivada del uso desmedido de antibióticos a nivel global ha emergido como un tema de creciente inquietud tanto para la salud pública como para el equilibrio del ecosistema. Esta preocupación se va agudizando por la introducción de nuevos agentes contaminantes en las fuentes de agua; la presencia de estos facilita la proliferación de genes, virus y bacterias como el SARS-CoC-2, que son resistentes a los antibióticos (Prakash, 2024), dicha resistencia varía significativamente con el tiempo y el espacio en donde se presenten (Okoye *et al.*, 2022). Esta incidencia, como se ha venido documentando en diversos estudios, ha evidenciado la presencia de estos compuestos incluso en fuentes de agua potable (Pires *et al.*, 2023; Teodosiu *et al.*, 2018; T. Zhang *et al.*, 2024).

El consumo indiscriminado de fármacos no solo afecta la salud humana, sino que también aumenta el desequilibrio ecológico y compromete la calidad del agua que será usada para la posible potabilización. La presencia de estos fármacos en el agua potable genera de manera indirecta una gesta involuntaria de estas sustancias por parte de la población, lo cual es debido a la ineficiencia de las plantas de potabilización para remover de manera adecuada estos contaminantes (Lee *et al.*, 2024; Rodil *et al.*, 2012). La persistencia de estos en el agua potable supone un

riesgo continuo que exige integrar diferentes perspectivas con el fin de evidenciar mejoras en las tecnologías de tratamiento.

Se ha identificado a las industrias farmacéuticas como una fuente relevante de contaminación de fármacos en las fuentes naturales (Prakash, 2024). Sin embargo, el consumo mundial de antibióticos sigue siendo una de las principales razones, esto debido a que se ha ido acrecentando en los últimos años, obteniendo un aumento en 76 países de 21,1 a 34,8 mil millones de dosis diarias definidas entre 2000 - 2015; esperando que esta dosis para 2030 alcance valores de hasta 126 mil millones de dosis diarias definidas (Okoye *et al.*, 2022). Estos antibióticos hacen parte de los contaminantes emergentes (Fan *et al.*, 2023), los cuales generalmente ingresan a las aguas superficiales por diversas vías, principalmente por vertimientos de aguas residuales crudas o inadecuadamente tratadas como se mencionó anteriormente <Brillas & Manuel Peralta-Hernández, 2023; Cano *et al.*, 2020; Elbalkiny *et al.*, 2019>.

La acumulación de antibióticos a largo plazo, logra representar un riesgo para los seres humanos, esto debido a que la mayoría de los problemas de salud están asociados a la calidad del agua y la proliferación de estos patógenos resistentes a los antibióticos (Kalu *et al.*, 2024; Tang *et al.*, 2018), evidenciando la presencia de estos y/o sus metabolitos en algunas muestras de orina, uñas, cerebro y otros tejidos del cuerpo humano (S. Wu *et al.*, 2025), lo cual altera la microbiota intestinal y el *resistoma*, además genera en los intestinos aumento de patógenos oportunistas y la incidencia de bacterias resistentes a los antibióticos (Sosa-Hernández *et al.*, 2021).

Sin embargo, se han presentado estudios donde se evidencia que las bacterias resistentes a antibióticos se han propagado desde la fuente de agua hasta la distribución del agua potable, pero pocos estudios han investigado las plantas de tratamiento de agua potable y cómo evolucionan estos en los sistemas de la misma, además, dichas plantas convencionales no suelen ser suficientemente sensibles para remover contaminantes de esta índole <Furia *et al.*, 2021; Gu *et al.*, 2023; S. Li *et al.*, 2023; K. Zhang *et al.*, 2020>.

En particular, los antibióticos como la tetraciclina y la vancomicina, pueden llegar al sistema de potabilización generando una posible resistencia microbioana, principalmente en las biopelículas, las cuales pueden ser transportadas y aumentar después del tratamiento de cloración (Kalu *et al.*, 2024; Zhou *et al.*, 2023). Adicionalmente, la presencia de estos indica que dichas bacterias están presentando la capacidad de sobrevivir en presencia de concentraciones de un antibiótico que inhibe a otro de la misma especie. Produciendo, que colonicen e infecten a los humanos (Alós, 2015). Un ejemplo de lo que se evidencia con esta resistencia, es el fenómeno que se observa en las denominadas superbacterias, las cuales ya contienen el gen *NDM-1*, que confiere resistencia a una amplia gama de antibióticos, lo que hace que su degradación sea mucho más complicada (G. Li *et al.*, 2023).

Debido a la ineficiencia de las plantas convencionales y la resistencia bacteriana, es necesario evaluar el sistema de tratamiento convencional de agua potable para la remoción de este antibiótico, o si es necesario proponer otras alternativas de tratamiento acopladas a este sistema, ya que, al tener una estructura compleja presentan un desafío para su eliminación en el agua. Por lo que compromete mejorar u optimizar dichos sistemas, y garantizar la inocuidad de este recurso tan importante para la salubridad (Chan *et al.*, 2009). Para ello, los procesos de oxidación avanzada (POA) han sido una alternativa de estudio, puesto que, se ha demostrado que son eficientes en la remoción de microcontaminantes orgánicos en el agua, cuando muchos procesos convencionales no logran ser efectivos (Yamamoto *et al.*, 2011).

Antecedentes

A pesar de los innegables beneficios que los antibióticos han aportado a la medicina moderna al reducir drásticamente las tasas de mortalidad y enfermedades causadas por patógenos, su uso generalizado ha dado lugar a una problemática adicional: la

contaminación ambiental, debido a contaminantes emergentes. Esta contaminación surge de la presencia y liberación de antibióticos en el medio ambiente, lo que plantea una preocupación importante para la salud pública y el equilibrio ecológico (Okoye *et al.*, 2022). En los últimos años, se ha observado un aumento en la prevalencia de bacterias resistentes a los antibióticos, lo que ha exacerbado el problema de la resistencia antimicrobiana. Esta situación representa como se dijo anteriormente una amenaza global para la salud, como lo demuestran cifras preocupantes. Por ejemplo, un estudio realizado en Beirut (Líbano) en 2019 reveló que aproximadamente 1,95 millones de muertes fueron atribuidas a la resistencia antimicrobiana (Haddad *et al.*, 2024).

En Colombia, la situación no es menos preocupante. Durante la pandemia de *Covid-19*, se identificó un uso generalizado de antibióticos como el meropenem, la cefepima, la ampicilina y la vancomicina. Este uso indiscriminado ha contribuido significativamente llegando a afectar hasta un 60% de los organismos de los pacientes (Díaz-Guio *et al.*, 2023; Haddad *et al.*, 2024). Estas cifras y muchas otras subrayan la urgencia de abordar la resistencia antimicrobiana como una prioridad de salud pública en la que se identifiquen procesos de tratamientos.

Por otro lado, en un estudio en Sudáfrica, por ejemplo, se presentan concentraciones de vancomicina de nanogramos por litro (ng/L) hasta 15 µg/L, los cuales ya se consideran de nivel tóxico para el ambiente, evidenciando efectos adversos en algunos organismos de la vida silvestre (Kasonga *et al.*, 2021). En China, se evidenció además presencia de genes como el *gen VanC* en las biopelículas de las redes de distribución de agua potable, las cuales eran resistentes a fármacos como la vancomicina, el cual es empleado en infecciones más resistentes (Zhou *et al.*, 2023). Adicionalmente, en el mismo país se presentó presencia de 15 genes de resistencia a los antibióticos en 2019, entre ellos a la vancomicina en las plantas de potabilización que oscilaban entre $0,13 \times 10^{-2}$ copias/celda, en donde una parte de ellos generaban subproductos más tóxicos con

la desinfección inadecuada de cloro, por lo cual se recomendaban procesos alternativos o combinados (Gu *et al.*, 2023).

Uno de los contaminantes más comunes en el consumo de la población es el acetaminofén, conocido principalmente como paracetamol ($C_8H_9NO_2$). Este antibiótico se han presentado en las fuentes de agua superficial y sedimentos, por ejemplo, en 2012 se presentó una investigación en donde el 94 % de los sedimentos estudiados en Marisma de Pego-Oliva, España, evidenciaba presencia de este en la fuente de agua (Vazquez-Roig *et al.*, 2012).

Análisis de Fuentes de Contaminación

Los antibióticos, como contaminantes emergentes más típicos, presenta actualmente un uso indebido y excesivo que hace que posteriormente sean vertidos de manera incorrecta a las fuentes de agua; una vez se encuentran allí pueden aumentar la resistencia de las bacterias y genes a estos antibióticos. Debido a esto, se han presentado diversos artículos de investigación donde se registran, por ejemplo, un total de 290 muestras de 60 embalses (o reservorios) en todo el mundo con puntos críticos de presencia de antibióticos (Guo *et al.*, 2023). Muchos de estos canales de ingreso son debidos a acciones humanas y operaciones industriales, sin embargo, la aplicación de biosólidos al suelo, lixiviación, agricultura y escorrentía urbana también son otras de las vías de ingreso en las que pueden encontrarse estos contaminantes en el agua (X. Li *et al.*, 2024).

Es relevante subrayar que los vertidos en los ríos facilitan directamente la transferencia de antibióticos a estos sistemas, lo que contribuye significativamente a su presencia en las plantas de tratamiento de agua potable (Guo *et al.*, 2023; P. Li *et al.*, 2020), Lamentablemente, estas plantas no logran eliminar eficazmente este tipo de fármacos, lo que se traduce en la detección de trazas

de antibióticos en el agua que llega a nuestros hogares a través de las redes de distribución (G. Li *et al.*, 2023).

Metodologías Más Empleadas Para Determinar Contaminantes Emergentes

La metodología aplicada en laboratorio tiene procesos extensos para la determinación de contaminantes emergentes, cada uno de ellos va a depender de las características del medio y del contaminante a estudiar. Para los fármacos estudiados, entre las técnicas para la matriz agua más empleadas se encuentra; la extracción en fase sólida, la microextracción en fase sólida, extracción asistida por microondas, extracción líquido-líquido, entre otras asociadas a la matriz estudiada (Dimpe & Nomngongo, 2016).

Una de las metodologías más implementadas es la extracción en fase sólida, adicionalmente, es la metodología recomendada por el *Standard Methods* en el procedimiento 1694 denominado “Pharmaceuticals and Personal Care Products in Water, Soil, Sediment, and Biosolids by HPLC / MS / MS” publicado en diciembre de 2007 (*Standard Methods*, s. f.); en la cual también especifican el procedimiento implementado para la matriz de sedimento, este proceso tiene la ventaja de tener gran selectividad y diferentes solventes dependiendo del contaminante que se desea reconocer (*Standard Methods*, s. f.).

Generalmente, este método para la matriz de agua, emplea cartuchos especiales, que son jeringas de polipropileno o de vidrio el cual tiene un medio absorbente que permite una selección de analitos para obtener así la extracción del contaminante por medio de una fase líquida, ya sea por gravedad o a presión con aire o nitrógeno principalmente, sin embargo, a pesar de sus

ventajas es un proceso lento (Płotka-Wasyłka *et al.*, 2023), el cual requiere una constante supervisión del proceso con el fin de que el cartucho no se tapone.

Otro de los elementos usados son los discos de fibra de vidrio, los cuales permiten emplear caudales mayores que los de los cartuchos, además de ello las partículas con menor diámetro presentan mejor consistencia y estos discos logran canalizarlo mucho mejor, sin embargo, dichos discos son más costoso que los cartuchos y solo se sugiere en casos particulares de analitos y solventes (Płotka-Wasyłka *et al.*, 2023).

La metodología de microextracción, es una técnica que usa una menor cantidad de volumen para la extracción, por lo tanto menos gastos en solventes, además de ello, requiere menos manipulación. La microextracción, es libre de solventes y emplea fibras de sílice como absorbente polimérico, sin embargo, requiere el uso de una membrana de fibra hueca adicional con el fin de mejorar el proceso de extracción y adsorción (Dimpe & Nomngongo, 2016).

Para la matriz de peces, el método *QuEChERS* (*Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged y Safe*), es un método simplificado muy empleado para la extracción de residuos o contaminantes. El método de *QuEChERS* emplea una extracción disolvente y una dispersiva en fase sólida, este tiene como fin realizar una homogeneización de la muestra matriz, en este caso del musculo del pez, de donde se extraen (Godfrey *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2019).

Alternativas al Tratamiento de Los Antibióticos Como Contaminantes Emergentes

Se han evidenciado diversos tratamientos para eliminar los antibióticos de manera alternativa en el agua, entre ellos se

presentan los *Procesos de Oxidación Avanzada (POA)*. Los *POA* se basan en procesos rédox los cuales pueden generar cambios en las estructuras químicas de diversos compuestos principalmente orgánicos.

Estos procesos se han destacado por su eficacia en la eliminación de antibióticos del agua, gracias a su rápida reacción y eficiencia. Este éxito se atribuye principalmente a la participación de especies como el radical hidroxilo (OH°), conocido por su alta reactividad y capacidad para degradar los compuestos (Correa-Sanchez & Peñuela, 2022; Parra-Enciso *et al.*, 2023). Además, los procesos de oxidación avanzada presentan ventajas significativas. Su flexibilidad permite utilizar diversas formas de generación de radicales hidroxilos, como la fotocatalisis heterogénea, la foto-Fenton, la ozonización, entre otros procesos (Zúñiga-Benítez *et al.*, 2016). Estas técnicas no solo son altamente efectivas en la eliminación de contaminantes, sino que también ofrecen la posibilidad de adaptarse a diferentes condiciones de tratamiento y tipos de contaminantes, lo que las convierte en herramientas versátiles y poderosas en la potabilización del agua.

Uno de los procesos más empleados es el *foto-Fenton*, el cual presenta una reacción eficiente para la eliminación de contaminantes emergentes como los antibióticos, esto debido a que puede oxidar una alta gama de compuestos por medio de los radicales hidroxilos, además a diferencia de otros métodos el proceso de *foto-Fenton* es efectivo en un mayor rango de potencial de hidrógeno (pH), siendo los pH ácidos los más efectivos. Dicho proceso, suele emplear reactivos como el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) como el oxidante de la reacción, y el hierro, los cuales son relativamente económicos y tienen una amplia disponibilidad en el medio, lo que hace que sea asequible usarlos para el tratamiento (M. Wu *et al.*, 2024).

La fotocatalisis heterogénea implica por otro lado, la activación de un semiconductor con radiación ultravioleta (*UV*), con el fin de generar una reacción con el agua y el oxígeno y así producir

los radicales hidroxilos. Este semiconductor, usa principalmente dióxido de titanio (TiO_2) el cual actúa como catalizador en la superficie del material excitado por la radiación (Martín de Vidales *et al.*, 2023). Dicho proceso de oxidación avanzado, aunque es muy efectivo, aún a gran escala no es tan común como otros procesos debido al costo del dióxido de titanio, el uso de la energía y las limitaciones de radiación solar en climas nublados o durante la noche.

En general, hay diversos procesos que pueden ser eficientes en la remoción de contaminantes emergentes, la ozonización, el UV / H_2O_2 , la fotólisis, entre otros. Sin embargo, los procesos de oxidación avanzada presentan una versatilidad ya que pueden adaptarse a diferentes tipos de contaminantes según las condiciones que se adecuen, además es eficiente en la generación de radicales hidroxilo y, por ende, en la eliminación de contaminantes emergentes. Ahora bien, dichos procesos requieren una inversión inicial significativa en estructura y equipos especializados, además de costos operativos continuos, lo cual puede que sea menos atractivo para grandes sistemas de tratamiento de agua.

Conclusión

Si bien los antibióticos han sido un pilar fundamental en la medicina moderna debido a la reducción de enfermedades infecciosas, el uso indiscriminado de estos ha desencadenado diversas problemáticas ambientales que ponen en evidencia una preocupante contaminación a nuestros sistemas hídricos principalmente. Dicha presencia de estos en el medio ha generado una resistencia antimicrobiana que amenaza la calidad del agua potable y por ende, la salud pública; debido a que estos sistemas convencionales no tienen la capacidad de remover dichos contaminantes. Los procesos avanzados de oxidación por su parte ofrecen una solución eficaz para la eliminación de estos

contaminantes, gracias a su capacidad de degradarlos de manera más efectiva y rápida por medio de la generación de radicales hidroxilos. Sin embargo, su implementación a gran escala enfrenta aún diversos desafíos debido a los costos operativos que pueden generar estos a gran escala.

Referencias Bibliográficas y Cibergráficas

- Alós, J.-I. (2015). Resistencia bacteriana a los antibióticos: Una crisis global. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 33(10), 692–699. <https://doi.org/10.1016/j.eimc.2014.10.004>
- Chan, Y. J., Chong, M. F., Law, C. L., & Hassell, D. G. (2009). A review on anaerobic–aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 155(1), 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.06.041>
- Correa-Sánchez, S., & Peñuela, G. A. (2022). Peracetic acid-based advanced oxidation processes for the degradation of emerging pollutants: A critical review. *Journal of Water Process Engineering*, 49, 102986. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102986>
- Díaz-Guío, D. A., Salazar-Ospina, M. A., Salazar-Palacio, C., Díaz-Gómez, A. S., Díaz-Guío, Y., Ricardo-Zapata, A., Castaño-Osorio, W., & Rodríguez-Morales, A. J. (2023). Characteristics and outcomes of patients with Covid-19 in intensive care in the first year of the pandemic: A Colombian observational study. *Acta Colombiana de Cuidado Intensivo*, 23(2), 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.acci.2022.10.002>
- Dimpe, K. M., & Nomngongo, P. N. (2016). Current sample preparation methodologies for analysis of emerging pollutants in different environmental matrices. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 82, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2016.05.023>
- Fan, Y., Pan, D., Yang, M., & Wang, X. (2023). Radiolabelling and in vivo radionuclide imaging tracking of emerging pollutants in environmental toxicology: A review. *Science of The Total Environment*, 866, 161412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161412>

- Furia, F., Minella, M., Gosetti, F., Turci, F., Sabatino, R., Di Cesare, A., Corno, G., & Vione, D. (2021). Elimination from wastewater of antibiotics reserved for hospital settings, with a Fenton process based on zero-valent iron. *Chemosphere*, 283, 131170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131170>
- Godfrey, A. R., Dunscombe, J., Gravell, A., Hunter, A., Barrow, M. P., Van Keulen, G., Desbrow, C., & Townsend, R. (2022). Use of QuEChERS as a manual and automated high-throughput protocol for investigating environmental matrices. *Chemosphere*, 308, 136313. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136313>
- Gu, Q., Lin, T., Wei, X., Zhang, Y., Wu, S., Yang, X., Zhao, H., Wang, C., Wang, J., Ding, Y., Zhang, J., & Wu, Q. (2023). Prevalence of antimicrobial resistance in a full-scale drinking water treatment plant. *Journal of Environmental Management*, 344, 118396. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118396>
- Guo, Z.-F., Boeing, W. J., Xu, Y.-Y., Borgomeo, E., Liu, D., & Zhu, Y.-G. (2023). Data-driven discoveries on widespread contamination of freshwater reservoirs by dominant antibiotic resistance genes. *Water Research*, 229, 119466. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119466>
- Haddad, N., Zeenny, R. M., El Halabi, C., Abdallah, T., El Helou, R., Zahreddine, N. K., Kanj, S. S., & Rizk, N. A. (2024). The experience of an antimicrobial stewardship program and antibiotic consumption and resistance trends during the Covid-19 pandemic at a tertiary care center in Beirut. *Journal of Infection and Public Health*, 17(2), 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2023.12.007>
- Kalu, C. M., Mudau, K. L., Masindi, V., Ijoma, G. N., & Tekere, M. (2024). Occurrences and implications of pathogenic and antibiotic-resistant bacteria in different stages of drinking water treatment plants and distribution systems. *Heliyon*, 10(2), e26380. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26380>

- Kim, L., Lee, D., Cho, H.-K., & Choi, S.-D. (2019). Review of the QuEChERS method for the analysis of organic pollutants: Persistent organic pollutants, polycyclic aromatic hydrocarbons, and pharmaceuticals. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 22, e00063. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2019.e00063>
- Lee, S., Choi, Y., Kang, D., & Jeon, J. (2024). Proposal for priority emerging pollutants in the Nakdong river, Korea: Application of EU watch list mechanisms. *Environmental Pollution*, 341, 122838. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122838>
- Li, G., Li, B., Yu, M., Wang, J., Jiang, L., Yu, Y., Sha, X., He, X., & Zhou, Z. (2023). Assessing the efficiency of ozone-based advanced drinking water treatment processes in removing antibiotics and antibiotic-resistant genes: Pilot-scale research. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104146. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104146>
- Li, P., Wu, Y., He, Y., Zhang, B., Huang, Y., Yuan, Q., & Chen, Y. (2020). Occurrence and fate of antibiotic residues and antibiotic resistance genes in a reservoir with ecological purification facilities for drinking water sources. *Science of The Total Environment*, 707, 135276. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135276>
- Li, S., Ondon, B. S., Ho, S.-H., Zhou, Q., & Li, F. (2023). Drinking water sources as hotspots of antibiotic-resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistance genes (ARGs): Occurrence, spread, and mitigation strategies. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103907. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103907>
- Li, X., Shen, X., Jiang, W., Xi, Y., & Li, S. (2024). Comprehensive review of emerging contaminants: Detection technologies, environmental impact, and management strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 278, 116420. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116420>

- Martín de Vidales, M. J., Prieto, R., Galán-Lucarelli, G., Atanes-Sánchez, E., & Fernández-Martínez, F. (2023). Eliminación de contaminantes de interés emergente mediante fotocátalisis con un catalizador de matriz nanotubular de TiO₂ altamente ordenado. *Catalysis Today*, 413–415, 113995. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2023.01.002>
- Okoye, C. O., Nyaruaba, R., Ita, R. E., Okon, S. U., Addey, C. I., Ebido, C. C., Opabunmi, A. O., Okeke, E. S., & Chukwudozie, K. I. (2022). Antibiotic resistance in the aquatic environment: Analytical techniques and interactive impact of emerging contaminants. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 96, 103995. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103995>
- Parra-Enciso, C., Avila, B. S., Rubio-Clemente, A., & Peñuela, G. A. (2023). Degradation of carbamazepine by the photo-Fenton process: Approach towards the elucidation of degradation by-products. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 442, 114801. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.114801>
- Pires, J., Santos, R., & Monteiro, S. (2023). Antibiotic resistance genes in bacteriophages from wastewater treatment plant and hospital wastewaters. *Science of The Total Environment*, 892, 164708. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164708>
- Plotka-Wasyłka, J., Jatkowska, N., Paszkiewicz, M., Caban, M., Fares, M. Y., Dogan, A., Garrigues, S., Manousi, N., Kalogiouri, N., Nowak, P. M., Samanidou, V. F., & de la Guardia, M. (2023). Miniaturized solid phase extraction techniques for different kind of pollutants analysis: State of the art and future perspectives – Part 1. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 162, 117034. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117034>
- Prakash, J. (2024). Ultrasensitive detection of emerging water contaminants using surface enhanced Raman scattering technique: Recent advancement, challenges, and future prospects. *Current Opinion in Environmental Science &*

- Health, 39, 100552. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2024.10055>
- Rodil, R., Quintana, J. B., Concha-Graña, E., López-Mahía, P., Muniategui-Lorenzo, S., & Prada-Rodríguez, D. (2012). Emerging pollutants in sewage, surface and drinking water in Galicia (NW Spain). *Chemosphere*, 86(10), 1040–1049. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.11.053>
- Sosa-Hernández, J. E., Rodas-Zuluaga, L. I., López-Pacheco, I. Y., Melchor-Martínez, E. M., Aghalari, Z., Limón, D. S., Iqbal, H. M. N., & Parra-Saldívar, R. (2021). Sources of antibiotics pollutants in the aquatic environment under SARS-CoV-2 pandemic situation. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100127. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100127>
- Standard Methods. (s. f.). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Recuperado el 13 de junio de 2023, de <https://www.standardmethods.org/>
- Tang, B., Du, J., Feng, Q., Zhang, J., Wu, D., Jiang, X., Dai, Y., & Zou, J. (2018). Enhanced generation of hydroxyl radicals on well-crystallized molybdenum trioxide/nano-graphite anode with sesame cake-like structure for degradation of bio-refractory antibiotic. *Journal of Colloid and Interface Science*, 517, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.01.098>
- Teodosiu, C., Gilca, A.-F., Barjoveanu, G., & Fiore, S. (2018). Emerging pollutants removal through advanced drinking water treatment: A review on processes and environmental performances assessment. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1210–1221. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.247>
- Vázquez-Roig, P., Andreu, V., Blasco, C., & Picó, Y. (2012). Risk assessment on the presence of pharmaceuticals in sediments, soils and waters of the Pego-Oliva Marshlands (Valencia, eastern Spain). *Science of The Total Environment*, 440, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.036>

- Wu, M., Guo, X., Cao, Y., Yu, H., Hu, Z., Yang, Y., Yao, T., & Wu, J. (2024). Fotosíntesis de H_2O_2 en cascada y reacción de Fenton para reacciones foto-Fenton autosuficientes: Una revisión de los avances recientes. *Chemical Engineering Journal*, 489, 151091. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151091>
- Wu, S., Tong, C., & Liu, J. (2025). Obesogenic effects of six classes of emerging contaminants. *Journal of Environmental Sciences*, 151, 252–272. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.03.032>
- Yamamoto, H., Tamura, I., Hirata, Y., Kato, J., Kagota, K., Katsuki, S., Yamamoto, A., Kagami, Y., & Tatarazako, N. (2011). Aquatic toxicity and ecological risk assessment of seven parabens: Individual and additive approach. *Science of The Total Environment*, 410–411, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.040>
- Zhang, K., Yuan, G., Werdich, A. A., & Zhao, Y. (2020). Ibuprofen and diclofenac impair the cardiovascular development of zebrafish (*Danio rerio*) at low concentrations. *Environmental Pollution*, 258, 113613. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113613>
- Zhang, T., Liao, P., Fang, L., & Zhang, D. (2024). Effect of booster disinfection on the prevalence of microbial antibiotic resistance and bacterial community in a simulated drinking water distribution system. *Environmental Pollution*, 341, 122902. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122902>
- Zhou, Z., Zhong, D., Zhang, Z., Ma, W., Chen, J., Zhuang, M., Li, F., Zhang, J., Zhu, Y., & Su, P. (2023). Biofilm on the pipeline wall is an important transmission route of resistome in drinking water distribution system. *Environmental Pollution*, 335, 122311. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122311>
- Zúñiga-Benítez, H., Aristizábal-Ciro, C., & Peñuela, G. A. (2016). Photodegradation of the endocrine-disrupting chemicals benzophenone-3 and methylparaben using Fenton reagent: Optimization of factors and mineralization/biodegradability

studies. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 59, 380–388. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.08.017>