

Desafíos de la sostenibilidad
en el **desarrollo:**
un enfoque desde
las **ciencias ambientales**

Jenny Lucia Huertas Delgado
Sandra Milena Madroñero Palacios

Compiladoras



Universidad
Mariana

Res. MEN 1362 del 3 de febrero de 1983



SOMOS TUQUERRES
¡Para un buen vivir!

CÁMARA DE COMERCIO DE PASTO
En Nariño, primero lo nuestro

RSC
RESPONSABILIDAD SOCIAL CORPORATIVA
Comercio de Comercio de Pasto



Yacuanquer Es Posible
Un Gobierno Al Servicio De Todos

Chalet Guamez
Laguna de la Cocha, Nariño, Colombia.



PDA NARIÑO
Plan Departamental para el manejo empresarial de los servicios de Agua y Saneamiento

EVOLTI®
Neo Energías

emas
by **VEOLIA**

Hotel Torre del Bosque



redin
facultad de ingeniería
Universidad de Antioquia

Insuasty
Consultoría
jaiminsu@gmail.com

empopasto

COLCHONES bambú
DREAMS

LA MERCED
RESTAURANTES

POLCO

Editorial Neogranadina



317 423 7223
verdeegestionambiental@gmail.com
@verdeegestionambiental
@verdeen_pasto

ProbioNar
Detergentes BIODEGRADABLES

IRHSA Ingeniería S.A.S.
Ingeniería de Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental



Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Nariño
SOUVENIRS
By Luis Ponce

Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las **ciencias ambientales**



Universidad
Mariana

Res. MEN 1362 del 3 de febrero de 1983



Editorial
Unimar

Colección
Evento

2024



Jenny Lucía Huertas Delgado
Sandra Milena Madroñero Palacios

Compiladoras

Madroñero Palacios, Sandra Milena, autora, compiladora

Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales / Sandra Milena Madroñero Palacios [y otros cuarenta y uno]; compiladoras, Jenny Lucía Huertas Delgado, Sandra Milena Madroñero Palacios. -- San Juan de Pasto: Editorial Unimar, 2024.

1 recurso en línea: archivo de texto: PDF. -- (Evento)

Incluye datos curriculares de los autores -- Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-628-7548-58-9

1. Ingeniería ambiental - Investigaciones - América Latina - Congresos, conferencias, etc. 2. Tecnología verde - Investigaciones - América Latina - Congresos, conferencias, etc. 3. Desarrollo sostenible - Investigaciones - América Latina - Congresos, conferencias, etc. 4. Sostenibilidad - Investigaciones - América Latina - Congresos, conferencias, etc. I. Jenny Lucia Huertas Delgado, autora, compiladora II. Mosquera Benítez, Héctor Damián, autor III. Abadía Gamboa, Vivian Liseth, autora IV. Garza Galicia, Alejandro, autor V. Aguilar, Jimmy, autor VI. Valdés, Jairo, autor

VII. Hernández, Francisco, autor VIII. Arias Jaco, Daro Cristian, autor IX. Chana Calderón, Leibnitz Eduardo, autor

CDD: 628.098 ed. 23

CO-BoBN– 00225



Universidad
Mariana

Res. MEN 1362 del 3 de febrero de 1983

Título del libro: *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales*

e-ISBN: 978-628-7548-58-9

DOI: <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258>

Formato: 18 x 26 cm – Digital

Páginas: 225

Año: 2024

© Editorial Unimar, Universidad Mariana

© Sandra Milena Madroñero Palacios

© Jenny Lucia Huertas Delgado

© Héctor Damián Mosquera Benítez

© Vivian Liseth Abadía Gamboa

© Alejandro Garza Galicia (Mexico)

© Jimmy Aguilar

© Jairo Valdés

© Francisco Hernández

© Daro Cristian Arias Jaco (El Salvador)

© Leibnitz Eduardo Chana Calderón

© Jorge Andrés Chamorro Enríquez

© Juan Carlos Narváez Burgos

© Santiago Miguel Hernández Erazo

© Paula Andrea Toledo Hurtado

© Luz Nathalia Torres Martínez

© Claudio Alberto Moreno Arias

© Oscar Chamarraví Guerra

© Ana Sofía Muñoz Villota
© Ivette Camila Yepez Moran
© Alejandro Díaz Iguá
© David Eraso García
© Edna Margarita Moncayo Torres
© Tito Manuel Piamba Mamián
© Paula Cortés Arévalo
© David Becerra Rincón
© Juan Sandoval Herrera
© Wilson Andrés Betancourt Villalobos
© Paola Alejandra Riascos López
© María Fernanda Tulcán Eraso
© Ángela Margarita Moncaleano Niño
© Rosa Catalina Hernández Gómez
© Nadson Ressayé Simões (Brasil)

Daisy Gabriela Guerrero Obando
Jennifer Jimenez Paz
Jenny Lucia Huertas Delgado
Mario Alberto Jurado Eraso
Luis Grabriel Lafaurie Ponce
Sandra Milena Madroñero Palacios
Francisco Ricardo Mafla Chamorro
Juan Carlos Narvaez Burgos
Santiago Gomez Herrera
Rocio Del Carmen Ojeda Ocaña
Pablo Jose Pabon Santacruz
Maria Margarita Portilla González
Luz Nathalia Torres Martínez
Jaime Efren Insuasty Enriquez
Gloria Lucia Cardenas Calvachi

Comité Organizador

Paola Andrea Ortega Guerrero
Daisy Gabriela Guerrero Obando
Jenny Lucia Huertas Delgado
Luis Grabriel Lafaurie Ponce
Sandra Milena Madroñero Palacios
Maria Margarita Portilla González
Luz Nathalia Torres Martínez

© Raúl Jiménez Guerrero (México)
© Diego Andrés Muñoz Guerrero
© Jorge Alberto Vélez Lozano
© Valeria Jurkauskas Campuzano
© Andrea Tamayo Londoño
© Laura Osorno Bedoya
© Dayana Elizabeth Botina Gómez
© María Camila Burbano Pantoja
© Anyi Paola España Bucheli
© Juan Carlos Narváez Narváez

Comité Científico

Paola Andrea Ortega Guerrero
Teresida Del Rocio Canchala Nastar

Editorial Unimar

Luz Elida Vera Hernández

Coordinadora editorial

Ana Cristina Chavez López

Corrección de estilo

María Alejandra Luna Marquez

Diseño

Johan Esteban Botina Portillo

Diagramación

Correspondencia:

Editorial Unimar, Universidad Mariana

San Juan de Pasto, Nariño, Colombia, Calle 18 No. 34 – 104

Tel: 6027244460 - Ext. 185

E-mail: editorialunimar@umariana.edu.co

Depósito Digital

Biblioteca Nacional de Colombia, Grupo Procesos Técnicos, Calle 24, No. 5 - 60 Bogotá D.C., Colombia.

Biblioteca Hna. Elisabeth Guerrero N. f.m.i. Calle 18 No. 34 - 104 Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia.

Disponible en: <http://editorial.umariana.edu.co/libros>

Cítese como: Huertas-Delgado, J. L. y Madroñero-Palacios, A. M. (comps.). (2024). *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales*. Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258>

Las opiniones contenidas en el presente libro no comprometen a la Editorial Unimar ni a la Universidad Mariana, puesto que son responsabilidad única y exclusiva de los autores; de igual manera, ellos han declarado que, en su totalidad, es producción intelectual propia, en donde aquella información tomada de otras publicaciones o fuentes, propiedad de otros autores, está debidamente citada y referenciada, tanto en el desarrollo del documento como en las secciones respectivas a la bibliografía.

El material de este libro puede ser reproducido sin autorización para uso personal o en el aula de clase, siempre y cuando se mencione como fuente su título, autores y editorial. Para la reproducción con cualquier otro fin, es necesaria la autorización de la Editorial Unimar de la Universidad Mariana.



Este libro está bajo licencia internacional:

CC BY Reconocimiento

Contenido

Capítulo 1. La aceptación comunitaria: ¿una cualidad del impacto ambiental?	11
Héctor Damián Mosquera Benítez, Vivian Liseth Abadía Gamboa	
Capítulo 2. Evaluación de la huella de carbono en un horno de ladrillo rojo	24
Alejandro Garza Galicia	
Capítulo 3. Diseño de una caja de emisividad portátil	37
Jimmy Aguilar, Jairo Valdés, Francisco Hernández	
Capítulo 4. Teledetección en el análisis del cambio forestal de la zona protegida San Marcelino, El Salvador, Centroamérica	51
Daro Cristian Arias Jaco	
Capítulo 5. Sistema automático y portable de monitoreo de material particulado utilizando IoT para determinar la calidad del aire en la ciudad de San Juan de Pasto	61
Leibnitz Eduardo Chana Calderón, Jorge Andrés Chamorro Enríquez, Juan Carlos Narváez Burgos	
Capítulo 6. Evaluación de la aplicación del proyecto Ambiental Escolar PRAE de la IEM Ciudad de Pasto	85
Santiago Miguel Hernández Erazo, Paula Andrea Toledo Hurtado, Luz Nathalia Torres Martínez	
Capítulo 7. Evaluación del desempeño de un sistema de condensación de gas de pirólisis de llantas a escala de laboratorio	96
Claudio Alberto Moreno Arias, Oscar Chamarraví Guerra	
Capítulo 8. Monitoreo para cultivos hidropónicos aplicando IoT y Visión Artificial mediante uso de energía solar	112
Ana Sofía Muñoz Villota, Ivette Camila Yopez Moran, Alejandro Díaz Iguá, David Eraso García, Edna Margarita Moncayo Torres, Tito Manuel Piamba Mamián	

Capítulo 9. ¿Qué tan sostenibles son las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado?	139
Paula Cortés Arévalo, David Becerra Rincón, Juan Sandoval Herrera	
Capítulo 10. Crisis ambiental y su gestión en sistemas dinámicos empresariales en Popayán, Cauca	151
Wilson Andrés Betancourt Villalobos, Paola Alejandra Riascos López	
Capítulo 11. Desafíos y perspectivas de la acuicultura de trucha arcoíris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) desde un enfoque hidrosocial	159
María Fernanda Tulcán Eraso, Ángela Margarita Moncaleano Niño, Rosa Catalina Hernández Gómez, Nadson Ressayé Simões	
Capítulo 12. Áreas urbanas en desuso, para implementar educación ambiental y compostaje de residuos orgánicos	180
Raúl Jiménez Guerrero	
Capítulo 13. Análisis de las características socioeconómicas y su importancia en los procesos de restauración ecológica en el humedal Ramsar La Cocha	188
Sandra Milena Madroñero Palacios, Diego Andrés Muñoz Guerrero, Jorge Alberto Vélez Lozano	
Capítulo 14. Evaluación del efecto de la aplicación de bioles y hongos micorrízicos arbusculares en <i>Helianthus annuus</i> para la biorremediación de suelos contaminados con zinc	198
Valeria Jurkuskas Campuzano, Andrea Tamayo Londoño, Laura Osorno Bedoya	
Capítulo 15. Evaluación de nutrientes en humus de café con <i>Ancognatha scarabaeoides</i> mediante compostaje y variación del sustrato	210
Dayana Elizabeth Botina Gómez, María Camila Burbano Pantoja, Anyi Paola España Bucheli, Juan Carlos Narváez Narváez	

Prólogo

En el contexto actual, la crisis ambiental se ha convertido en un tema de discusión que permea tanto el ámbito político como el económico. La implementación de nuevas políticas públicas destinadas a mitigar los impactos negativos en el medio ambiente se ha vuelto cada vez más común; en paralelo, la academia ha asumido el papel fundamental de generar y difundir conocimiento mediante la investigación, identificando constantemente nuevos problemas ambientales y proponiendo soluciones innovadoras.

Simultáneamente, las actividades comerciales se han visto afectadas por esta dinámica ambiental, impulsándolas a buscar soluciones que minimicen su impacto. Así, se hace necesario el trabajo colaborativo entre la academia, la investigación y el sector externo a las instituciones académicas para catalizar el desarrollo de soluciones desde una perspectiva de investigación, desarrollo e innovación (I+D+I), contribuyendo a mejorar las condiciones ambientales actuales.

Esta crisis ambiental no conoce fronteras ni distinciones, permea el ámbito político, económico y social, obligando a todos los sectores de la sociedad a reevaluar sus prácticas y políticas. Desde las aulas universitarias hasta las salas de conferencias internacionales, las ciencias ambientales ofrecen soluciones innovadoras y estrategias de gestión que podrían mitigar los impactos negativos sobre los componentes ambientales.

El 3er Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, organizado por la Universidad Mariana y su programa de Ingeniería Ambiental, es un claro ejemplo de esta sinergia necesaria entre academia, sector público y privado. Durante dos días en noviembre de 2023, expertos de Argentina, México, Ecuador y Colombia compartieron sus avances y visiones en áreas críticas como diagnóstico y remediación ambiental, gestión de recursos y energías renovables.

Este libro compila las contribuciones más destacadas de ese evento, ofreciendo una visión de los avances científicos y tecnológicos en la búsqueda de la sostenibilidad ambiental. Desde el análisis de la degradación de recursos naturales hasta la presentación de soluciones prácticas implementadas en diferentes países de la región.

Para finalizar, se espera que este libro motive a académicos, profesionales y ciudadanos comprometidos a abordar con rigor científico y creatividad los desafíos ambientales contemporáneos. Constituye tanto un llamado a la acción informada como un reconocimiento del potencial científico para desarrollar soluciones sostenibles que beneficien a las generaciones futuras.

Sandra Milena Madroñero Palacios
Docente Ingeniería Ambiental
Universidad Mariana

Capítulo 1.

La aceptación comunitaria: ¿una cualidad del impacto ambiental?¹

Héctor Damián Mosquera Benítez²

Vivian Liseth Abadía Gamboa³


Cítese como: Mosquera-Benítez, H. D. y Abadía-Gamboa, V. L. (2024). La aceptación comunitaria: ¿una cualidad del impacto ambiental?. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 11-23). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c419>


Resumen

Este artículo muestra los resultados de un estudio descriptivo que tuvo como propósito principal elaborar un concepto de la variable 'Aceptación comunitaria del impacto ambiental' y validar su inclusión en las ecuaciones que se utilizan en los estudios de impacto ambiental, aplicando la Valoración Cualitativa de Impactos Ambientales (VACIA). Se utilizó un cuestionario aplicado a los expertos que asistieron al Tercer Congreso Internacional de Ciencias Ambientales en la Universidad Mariana de la ciudad de Pasto, Nariño, Colombia. 17 expertos respondieron el cuestionario, de los cuales 13 contestaron afirmativamente a la pregunta sobre si estaban de acuerdo en considerar a la aceptación comunitaria como una característica social del impacto ambiental; cuatro respondieron que no. Con estos resultados, en conclusión, se valida la hipótesis, en el sentido de que es posible establecer dicho parámetro como una cualidad de los impactos ambientales y, por consiguiente, podrá incluirse en las ecuaciones que se empleen para calcular la importancia de los impactos ambientales en el marco de la VACIA.

Palabras clave: valoración; impacto ambiental; comunidad

¹ Capítulo resultado de la investigación titulada: *Participación comunitaria en la evaluación del impacto ambiental*, desarrollada desde marzo de 2021 hasta noviembre de 2021, en la ciudad de Quibdó, departamento del Chocó, Colombia.

² Doctor en Gestión Ambiental, AIU, U.S.A. Docente investigador Universidad Tecnológica del Chocó. Integrante del Grupo de Estudios Ambientales, Quibdó, Chocó, Colombia. Correo electrónico: hector.mosquerab@gmail.utch.edu.co 

³ Magíster en Gerencia y Práctica del Desarrollo, UNIANDES. Joven investigadora Universidad Tecnológica del Chocó. Integrante del Grupo de Estudios Ambientales, Quibdó, Chocó, Colombia. Correo electrónico: viliaga06@gmail.com 

Introducción

En un estudio exploratorio, Mosquera-Benítez (2020) encontró que, si bien la participación pública se contempla en todas las regulaciones de los países relacionadas con el proceso de toma de decisiones ambientales, también es cierto que las comunidades no se hallan representadas en las ecuaciones matemáticas empleadas para valorar los impactos ambientales, particularmente cuando se aplica la Valoración Cualitativa de Impactos Ambientales (VACIA), mayormente utilizada en Colombia, como manifiestan Toro et al. (2013) y, tampoco, en las otras naciones de Iberoamérica. Este artículo tiene como objetivo mostrar los resultados de un trabajo investigativo que se propuso describir la variable 'Aceptación del impacto' por parte de las comunidades o *stakeholders* que se encuentren en el área de influencia de un proyecto, obra o actividad susceptibles de producir cambios en los componentes ambientales a su alrededor, teniendo en cuenta además, que los responsables de los proyectos tramitan una autorización o licencia ambiental para poder ejecutar las actividades correspondientes. Para someter a validación la propuesta de incluir dicha variable en la VACIA, se puso en consideración de los investigadores expertos en el tema, un instrumento documental; para este caso, un cuestionario que fue validado en contenido por expertos de universidades colombianas, todos reconocidos como investigadores por el Ministerio de Ciencia y Tecnología colombiano.

Por otro lado, conviene mencionar que son escasos los estudios que se realizan con el propósito de plantear modificaciones a las expresiones matemáticas que se emplean en la valoración ambiental, específicamente pretendiendo incluir una variable que represente la participación pública; no se encuentran referencias bibliográficas que centren su atención en este aspecto de la evaluación ambiental; de allí la importancia del trabajo investigativo que respalda este artículo. Es también importante fijar los límites de esta pretensión, ya que solo tiene que ver con las metodologías cualitativas que se usa para valorar impactos ambientales, particularmente con las sugeridas por los gobiernos de muchos países que orientan a los interesados en autorizaciones ambientales respecto a los atributos que deben tenerse en cuenta para una valoración de impactos.

Se plantea entonces, un debate interesante en si los impactos ambientales soportan incluir una característica social para su valoración o, si por el contrario, debe valorarse únicamente sus parámetros físicos como cualidades indiscutibles.

Este artículo contempla las siguientes secciones: una parte que se aproxima a definir y conceptualizar la variable 'Aceptación del impacto ambiental' con un ejemplo práctico sobre su aplicabilidad; otra, sobre el método empleado para validar su inclusión en la VACIA; en otra, se presentan los resultados; en la parte de conclusiones, se analizan los resultados del trabajo investigativo adelantado.

Breve estado de la cuestión

De acuerdo con Mosquera-Benítez (2020), el primer modelo identificado en cuanto al nivel de participación de las comunidades es el de Arnstein, también conocido como ‘Escalera de Participación’, el cual consiste en una escalera con peldaños que corresponden a la extensión del poder ciudadano para determinar un plan y/o programa sujeto a consulta. Esta escalera comienza con su nivel más bajo de participación, denominado ‘Manipulación’, y termina en el grado más alto, denominado ‘Control ciudadano’. No hay participación en el peldaño más bajo, que mejora mientras se asciende al nivel más alto de participación efectiva (Arnstein, 1969); un interesante análisis planteado por Arnstein debate quién tiene el poder cuando se toman decisiones importantes durante un proceso de participación.

Sin embargo, el modelo de ‘Aceptabilidad pública’ propuesto por John Thomas (1993) sugiere que, el grado deseable de participación pública varía según el tema; los temas que requieren una mayor ‘aceptabilidad’ exigen una mayor participación, mientras que los temas con mayores requisitos de ‘calidad’ son menos exigentes. Esto también se considera ‘participación política’ versus ‘participación técnica’ según Thomas, quien desvela la necesidad de elevar el nivel de información o capacitación de los interesados en su enfoque.

Durante el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), Roberts (1995) creyó necesario involucrar al público; usó el término ‘participación pública’ y luego lo dividió en ‘consulta’ y ‘participación’. La consulta incluye educación, información compartida y negociación, con el objetivo de tomar mejores decisiones, mientras que la participación significa incorporar a la ciudadanía en el proceso de toma de decisiones (Sánchez, 2011). En este análisis, ambos términos son considerados iguales, ya que ambos casos involucran la influencia del público en los procesos de toma de decisiones.

La consulta pública para las decisiones ambientales no siempre está ligada a un mandato legal requerido por las entidades gubernamentales; más bien, se puede realizar ‘voluntariamente’, supervisando el inicio del mismo por parte de las empresas involucradas durante la implementación de los proyectos de inversión, lo que se conoce como ‘participación voluntaria’. La sugerencia de Azinger (1998, como se cita en Mosquera-Benítez, 2020), es que luego de sentir la necesidad de la consulta pública, la empresa debe identificar a los grupos de interés que, normalmente, son comunidades en el área de influencia del proyecto y luego, planificar el proceso con ellos.

Recientemente, académicos canadienses propusieron el modelo de Evaluación Cívica Ambiental (EA Cívica), que pretende redefinir la participación pública sobre la base de ciudadanos activos, un espíritu deliberado y enfocado hacia el aprendizaje (Sinclair y Diduck, 2017), una propuesta interesante que, durante su implementación entrega conceptos ambientales a las comunidades a través de

breves procesos educativos a lo largo de una experiencia de participación pública. De manera similar, algunos académicos han contribuido al desarrollo teórico de la participación pública en la evaluación ambiental: por ejemplo, Lienhoop (2018), Wu et al. (2017); Hasan et al. (2018); Glucker et al. (2013), Meredith (2000, como se cita en Mosquera-Benítez, 2020), Salomons y Hoberg (2014), Bastidas (2004), Okubo (2016), Rega y Baldizzone (2015) y, Hartley y Wood (2005).

En la literatura no se encontró la necesidad de integrar ciertas variables relacionadas con la participación de las comunidades en la determinación de la importancia de los impactos que se pronostica durante la EIA. Sin embargo, los autores japoneses Takahashi y Sato (2015) trabajaron desde una perspectiva diferente e indicaron que el desarrollo de sistemas energéticos en el futuro dependerá del equilibrio entre el impacto ambiental, la viabilidad económica y la aceptación pública; concluyeron que la tecnología de generación de energía alternativa puede no ser sostenible o eficaz si plantea dificultades de aceptación pública. Otros autores, como Langer et al. (2018), Eswarlal et al. (2014) y, Roddis et al. (2018) muestran avances en esta línea de trabajo. Incluso, Johnson et al. (2018) reconocen la variable ‘Aceptación pública’, pero insisten en la dificultad de medirla. La aceptación pública comienza a mostrar el desarrollo de un posible atributo para una EIA. Si bien esta variable aparece mucho cuando Sánchez (2012) menciona que los impactos ambientales pueden ser aceptados o rechazados por las comunidades, estas dos expresiones (aceptación o rechazo) podrían ser los valores considerados para el atributo de aceptación en la implementación de una evaluación cualitativa de impactos ambientales.

Una aproximación conceptual de la variable ‘Aceptación del impacto’

Según el Diccionario de la Lengua Española (Real Academia Española, RAE, 2001), el término ‘aceptación’ significa, acción y efecto de aceptar, aprobación, aplauso; esta palabra se puede utilizar para denominar la cualidad social de los impactos ambientales, representada por el símbolo (Ap), con el significado más amplio de ‘aceptación comunitaria del impacto ambiental’. Este parámetro puede incluirse como uno de los atributos necesarios para realizar el cálculo de la importancia de los impactos ambientales, en aplicación de la metodología VACIA, cuando se encuentren comunidades negras e indígenas en el área de influencia de proyectos, obras o actividades, que requieran la expedición de una licencia ambiental por parte de las autoridades ambientales en Colombia. También, en cualquier sector urbano o rural del mundo donde participen grupos de interés o *stakeholders*, en el proceso de elaboración de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o estudio similar, sujeto a las normas ambientales de cada país.

Dado que en la revisión de la literatura efectuada no se halló en ninguno de los países consultados la acción vinculante de la participación comunitaria en las

evaluaciones ambientales respecto a la decisión de ejecución o no de un proyecto en sus territorios o para vetar un impacto ambiental determinado, la introducción de la variable 'Aceptación' en el método de valoración cualitativa contribuiría a que el encargado de la decisión la tomara con mayor apoyo argumentativo, dando valor a los intereses comunitarios. Para tranquilidad de los dueños de proyectos, la participación comunitaria continuaría siendo no vinculante, e influiría en el valor de la importancia de los impactos ambientales.

La ventaja principal de esta nueva variable radica en que afectaría de alguna forma la jerarquía de algunos impactos, elevando la importancia de aquellos que sean rechazados por las comunidades o, manteniendo su valor para los aceptados. Muy posiblemente, impactos jerarquizados como irrelevantes por quienes elaboran el estudio, en caso de ser rechazados y, por consiguiente, al aumentar su valor de importancia, pasen al nivel de moderados en la escala de jerarquía; o aquellos calificados como moderados, podrían pasar a severos al aumentar el valor de su importancia o calificación ambiental, lo que también podría suceder en el paso de severos a críticos, aplicando la ecuación 1 y criterios de Tablas 1 y 2 de Vicente Conesa (1993), metodología más utilizada en Colombia según Toro et al. (2013) y, muy posiblemente, en Iberoamérica.

$$I = \pm (3IN+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC) \quad (1)$$

Con la inclusión de la nueva variable quedaría, como muestra la ecuación 2:

$$I = \pm (3IN+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC+Ap) \quad (2)$$

Ejemplo de aplicación práctica:

En el Estudio de Impacto Ambiental elaborado por la empresa Universal Stream Ltda. (2012), para obtener licencia ambiental con el fin de desarrollar un proyecto hidroeléctrico en la Cuenca Alta del río Atrato (CAA), en 2012, documento que se encuentra en el Centro de Documentación de la Corporación Autónoma Regional para el Desarrollo Sostenible del Chocó (CODECHOCÓ), en el numeral 5.3, página 6, acerca de la metodología aplicada, expresa que se utiliza el modelo de evaluación de Conesa (1993) y usan una variación de la ecuación 1, así:

$$\text{Importancia} = \pm (3I+2E+M+P+R) \quad (3)$$

Y unos criterios que se muestra en las tablas 3 y 4:

En el mismo estudio, página 22, donde se describen y califican los impactos, aparece uno pronosticado como 'cambios en la calidad del suelo' que se producirá durante la etapa de construcción y con el código C.2-3, entre otras actividades que lo generarán. Dicho impacto, calificado como negativo, tiene una importancia de 45 y, por consiguiente, es ubicado como 'moderado'.

Si a la ecuación de importancia utilizada por dicha empresa se le hubiera agregado el atributo ‘aceptación’, como se propone aquí, la importancia hubiera quedado así:

$$\text{Importancia del impacto} = 45 + (1) A_p \quad (4)$$

Con la mínima ponderación de uno en la ecuación 4 y, si el impacto se hubiese sometido a consulta con las comunidades, estarían las opciones de ser aceptado con $A_p = 0$ o, medianamente aceptado con $A_p = 5$ o, rechazado por las comunidades con $A_p = 10$. En uno de los dos últimos casos, la importancia cambiaría a 50 o a 55, pasando de un impacto moderado a severo en la jerarquía de Universal Stream y también en la de Conesa.

Si bien estos resultados no tendrían un efecto vinculante, en tanto no afectarían la toma de decisión respecto a otorgar o no la licencia ambiental, también es cierto que la mayor calificación del impacto, al aumentar su importancia, convertiría al impacto en mayormente observable y monitoreado para las autoridades ambientales y, la medida de manejo sería más exigente. Ahí se centra el aporte de este nuevo atributo al cálculo de la importancia de los impactos ambientales.

Tabla 1

Criterios de Conesa, incluido el nuevo atributo ‘aceptación’

Naturaleza		Intensidad (IN)	
-Impacto beneficioso	+	-Baja o mínima	1
-Impacto perjudicial	-	-Media	2
		-Alta	4
		-Muy alta	8
		-Total	12
Extensión (EX)		Momento (MO)	
-Puntual	1	-Largo plazo	1
-Parcial	2	-Medio plazo	2
-Amplio o extenso	4	-Corto plazo	3
-Total	8	-Inmediato	4
-Crítico	(+4)	-Crítico	(+4)

Persistencia (PE)		Reversibilidad (RV)	
-Fugaz o efímero	1	-Corto	1
-Momentáneo	1	-Medio plazo	2
-Temporal o transitorio	2	-Largo plazo	3
-Pertinaz o Persistente	3	-Irreversible	4
-Permanente y Constante	4		
Sinergia (SI)		Acumulación (AC)	
-Sin sinergismo o simple	1	-Simple	1
-Sinergismo moderado	2	-Acumulativo	4
-Muy sinérgico	4		
Efecto (EF)		Periodicidad (PR)	
-Indirecto o secundario	1	-Irregular (Esporádico)	1
-Directo o primario	4	-Periódico o intermitente	2
		-Continuo	4
Recuperabilidad (MC)		Aceptación (Ap)	
-Recuperable inmediatamente	1	-Aceptación	0
-Recuperable a corto plazo	2	-Mediana aceptación	5
-Recuperable a medio plazo	3	-Rechazo	10
-Recuperable a largo plazo	4		
-Mitigable, sustituible y compensable	4	Importancia	
-Irrecuperable	8	(Grado de manifestación del impacto)	
		$I = \pm$	
		$(3IN+2EX+MO+PE+RV+SI+AC+EF+PR+MC+Ap)$	

Nota. Modificado de Conesa (1993).

Tabla 2

Jerarquía de impactos ambientales según Conesa (1993)

Jerarquía de los impactos (Con base en la importancia)			
Irrelevante	Moderado	Severo	Crítico
< 25	> 25 y < 50	> 50 Y < 75	>75

Nota. Conesa (1993)

Tabla 3

Criterios usados por Universal Stream (2012)

Signo		Magnitud (I)	
Impacto benéfico	+1	Baja	4
Impacto adverso	-1	Media	10
		Alta	16
		Total	20
Extensión (E)		Momento (M)	
Puntual	2	Largo plazo	1
Local	4	Medio plazo	2
Regional	8	Inmediato	4
Persistencia / Duración (P)		Reversibilidad (R)	
Temporal	1	Corto plazo	1
Prolongado	2	Medio plazo	2
Permanente	4	Largo plazo	4
		Irreversible	8

Nota. Universal Stream (2012)

Tabla 4

Jerarquía de los impactos ambientales por Universal Stream (2012)

Acometividad del impacto según su importancia			
Irrelevante	Moderado	Severo	Crítico
< -28	-28 a -45	-45 a -62	< -63

Nota. Universal Stream (2012)

Materiales y métodos

El trabajo de investigación que permite elaborar este artículo tuvo un alcance descriptivo; se utilizó un instrumento documental para la recolección de los datos. Se elaboró un cuestionario con cinco preguntas, que fue validado en contenido mediante la evaluación de cinco investigadores colombianos reconocidos como tales por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de Colombia.

El cuestionario aplicado a los expertos, durante el desarrollo del Tercer Congreso Internacional de Ciencias Ambientales, organizado por la Universidad Mariana de Pasto, Nariño, consta de las siguientes partes: en la primera sección se requiere información general del participante, relacionada con nombre, institución donde está vinculado y dirección electrónica. En el ítem 1 se pregunta si está de acuerdo o no sobre la definición de la nueva variable que representa la participación de las comunidades en la VACIA. En las preguntas 2 a 3 se desea saber si está de acuerdo con que la ecuación típica de la VACIA pueda modificarse. Los ítems 4 a 5 se relacionan con la ponderación de la variable en la ecuación propuesta y los valores que se pueden asignar para su valoración.

Resultados

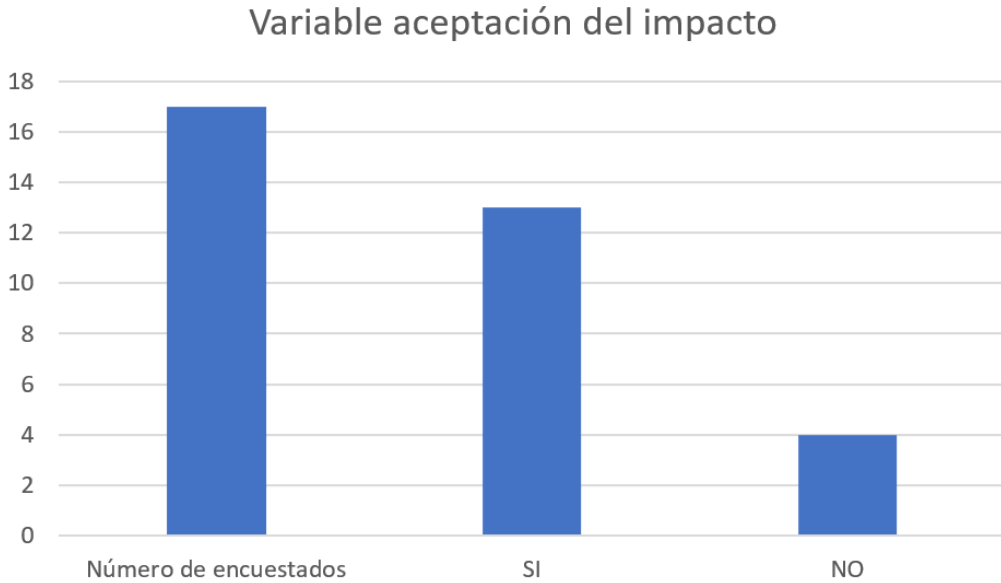
Relacionados con el cuestionario

Del total de 17 expertos consultados con igual número de cuestionarios diligenciados, 13 respondieron Sí a la pregunta sobre si la variable 'Aceptación del impacto' debería incluirse en la valoración cualitativa. Las respuestas a las otras tres preguntas fueron igualmente positivas, tanto para la modificación de la ecuación de importancia de Conesa como para los criterios de valor que se puede asignar a la variable y aquella que considera a la aceptación como una cualidad social de los impactos ambientales. Cuatro optaron por el No y, por consiguiente, no respondieron el resto de preguntas. Ese 76 % de aprobación es meritorio para que las regulaciones internacionales contemplen la posibilidad de realizar

adaptaciones normativas que cristalicen la propuesta. En la Figura 1 se muestra el resultado gráficamente.

Figura 1

Resultados de la aplicación del cuestionario a expertos



Conclusiones

Se puede afirmar que la hipótesis del estudio, en el sentido de si era posible incluir una variable o atributo en VACIA, ha sido validada por los expertos ambientales. Respecto al paso siguiente en Colombia, la Universidad Tecnológica del Chocó, a través del Grupo de Estudios Ambientales, hará la gestión ante el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para que se elabore una propuesta de modificación de la Metodología General para la Elaboración y Presentación de Estudios Ambientales, específicamente en los capítulos 3 y 7, relacionados con 'Participación y socialización con las comunidades' y Evaluación Ambiental, respectivamente.

Referencias

- Arnstein, S. (1969). A ladder of Citizen Participation. *Journal of the American Institute of Planners*, 216-224. <https://doi.org/10.1080/01944366908977225>
- Bastidas, S. (2004). The role of public participation in the impact assessment of trade process [Ponencia] *Impact Assessment for Industrial Development*. <https://www.uv.es/~fernandm/Bastidas.pdf>.
- Conesa, V. (1993). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (2.ª ed.). Mundi-Prensa.
- Eswarlal, V., Vasudevan, G., Dey, P., & Vasudevan, P. (2014). Role of community acceptance in sustainable bioenergy projects in India. *Energy Policy*, 333-343. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.04.019>
- Glucker, A., Driessen, P., Kolhoff, A., & Runhaar, H. (2013). Public participation in environmental impact assessment: Why, who and how? *Environmental Impact Assessment Review*, (43), 104-111. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.06.003>
- Hartley, N., & Wood, C. (2005). Public participation in environmental impact assessment-implementing the Aarhus Convention. *Environmental Impact Assessment Review*, 319-340. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2004.12.002>
- Hasan, M., Nahiduzzaman, K., & Aldosary, A. (2018). Public participation in EIA: A comparative study of the projects run by government and non-governmental organizations. *Environmental Impact Assessment Review*, (72), 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.05.001>
- Johnson, E., Terese, E., & Ndubuisi, S. (2018). Public participation in environmental impact assessment in EIA: A critical analysis. *Architecture and Engineering*, 3(1), 7-12. <https://doi.org/10.23968/2500-005-2018-3-1-7-1233Sqqq>
- Langer, K., Decker, T., Roosen, J., & Menrad, K. (2018). Factors influencing citizens' acceptance and non-acceptance of wind energy in Germany. *Journal of Cleaner Production*, (175), 133-144. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.221>
- Lienhoop, N. (2018). Acceptance of wind energy and the role of financial and procedural participation: An investigation with focus groups and choice experiments. *Energy Policy*(118), 97-105. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.063>
- Mosquera-Benítez, H. (2020). Public participation in Environmental Impact Assessment (EIA): acceptance of the impact. *Luna Azul*, 65-76. <https://doi.org/10.17151/luaz.2020.51.4>

- Okubo, N. (2016). The development of the Japanese legal system for public participation in land use and environmental matters. *Land Use Policy*, (52), 492-500. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2014.12.011>
- Real Academia Española (RAE). (2001). Diccionario de la Lengua Española: aceptación. <https://www.rae.es/drae2001/aceptaci%C3%B3n>
- Rega, C., & Baldizzone, G. (2015). Public participation in Strategic Environmental Assessment: A practitioners' perspective. *Environmental Impact Assessment review*, (50), 105-115. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2014.09.007>
- Roberts, R. (1995). Public involvement: from consultation to participation. En F. Vanclay, & D. Bronstein, *Environmental and Social Impact Assessment* (pp. 221-246). John Wiley & Sons.
- Roddis, P., Carver, S., Dallimer, M., Norman, P., & Ziv, G. (2018). The role of community acceptance in planning outcomes for onshore wind and solar farms: An energy justice analysis. *Applied Energy*, (226), 353-364. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.05.087>
- Salomons, G., & Hoberg, G. (2014). Setting boundaries of participation in environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review*, (45), 60-75. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2013.11.001>
- Sánchez, L. E. (2011). *Evaluación del impacto ambiental: conceptos y métodos*. Ecoe Ediciones.
- Sánchez, M. C. (2012). *Análisis de la participación ciudadana en los procesos de evaluación de impacto ambiental* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal21567>
- Sinclair, A. J., & Diduck, A. P. (2017). Reconceptualizing public participation in environmental assessment as EA civics. *Environmental Impact Assessment Review*(62), 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.03.009>
- Takahashi, T., & Sato, T. (2015). Inclusive environmental impact assessment indices with consideration of public acceptance: Application to power generation technologies in Japan. *Applied Energy*, (144), 64-72. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.053>
- Thomas, J. (1993). Public Involvement and Governmental Effectiveness: a decision-making model for public managers. *Administration & Society*, 24(4), 444-469. <https://doi.org/10.1177/009539979302400402>

Toro, J., Martínez, R. y Arrieta, G. (2013). Métodos de evaluación de impacto ambiental en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 4(2), 43-53. <https://10.22490/21456453.990>

Universal Stream LTDA. (2012). *Estudio de Impacto Ambiental proyecto hidroeléctrico Cuenca Alta del río Atrato*. Quibdó.

Wu, J., Chang, I., Yilihamu, Q., & Zhou, Y. (2017). Study on the practice of public participation in environmental impact assessment by environmental non-governmental organizations in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(74), 186-200. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.178>

Capítulo 2.

Evaluación de la huella de carbono en un horno de ladrillo rojo¹

Alejandro Garza Galicia²


Cítese como: Garza-Galicia, A. (2024). Evaluación de la huella de carbono en un horno de ladrillo rojo. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 24-36). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c420>

Resumen

Uno de los procesos más contaminantes en México es la producción de ladrillo rojo; su importancia radica en la economía y desarrollo de diferentes grupos marginados, siendo un pilar para el desarrollo de la industria de la construcción residencial; sin embargo, genera una significativa huella de carbono que, al mismo tiempo, ha provocado un problema toxicológico por la cantidad de enfermedades en la población dedicada a este sector. El presente trabajo tiene por objetivo, obtener la huella de carbono real mediante el monitoreo de las emisiones de monóxido y bióxido de carbono a la atmósfera, por la combustión abierta de un horno tradicional, al determinar las cantidades de carbono equivalente y comparar la huella obtenida por el monitoreo con la calculada por la metodología de factores equivalentes. Se identificó que la huella del monitoreo es 48 % mayor, lo que significa que, factores alusivos al proceso como la geometría, el tamaño y el acomodo de la leña, el régimen de flujo dentro de la cámara de combustión y las pérdidas por transferencia de calor, hacen que la combustión en este tipo de hornos funcione con una eficiencia muy baja, provocando serios efectos al cambio climático.

Palabras clave: ladrilleras; combustión abierta; huella de carbono; cambio climático; toxicología

¹ Capítulo resultado de la investigación titulada: *Análisis de la producción de ladrillo en el municipio de Tlajomulco de Zuñiga Jalisco*, desarrollada desde el 27 de diciembre de 2018 hasta el 12 de agosto de 2020 en UNIVA campus Guadalajara.

² Doctorando en Energía, Universidad de Guadalajara México. Docente investigador Universidad del Valle de Atemajac. Integrante de la Jefatura de Investigación UNIVA Campus Guadalajara. Correo electrónico: a.garza@univa.mx 

Introducción

El calentamiento global es el fenómeno más agresivo que la humanidad está enfrentando; en recientes fechas se ha agravado y es el tema de muchos estudios científicos y sociales, por la gran cantidad de afectaciones; los grupos políticos han puesto la temática en las agendas internacionales y domésticas, como una prioridad para poder disminuir los gases efecto invernadero (GEI) que provocan las actividades y el uso de combustibles fósiles; sin embargo, las últimas reuniones de mayor importancia, llamadas COP o cumbres del medio ambiente, poco han logrado en materia de avances o compromisos serios para la disminución del efecto, mientras que en muchos lugares ya se alcanzó el incremento de la temperatura de 1.5 °C que se había fijado como límite para las acciones.

Las afectaciones a especies y biodiversidad son sustanciales; se está llegando a la posibilidad de un estrés hídrico mundial por la falta de agua. La capacidad de los campos agrícolas cada vez se ve disminuida, por lo que los productores incrementan el uso de fertilizantes químicos. La generación de basura y residuos de toda índole ha incrementado su volumen y, la capacidad de reutilizarlos o reciclarlos es baja, por lo que muchos de los rellenos sanitarios están a su máxima capacidad, volviéndose un problema enorme para los municipios. La quema de combustibles sólidos en áreas conurbadas y en pueblos sigue siendo una actividad común para satisfacer las necesidades de los hogares. Y, en los procesos rústicos como la elaboración de comida o la fabricación de ladrillo, donde el principal combustible es la leña, en el mejor de los casos, se puede utilizar basura o ropa.

La comunidad científica y la sociedad luchan incesantemente a través de investigaciones y manifestaciones, pero, hasta el momento solo se ha tomado soluciones limitadas y se ha dado un discurso entre lo científico y lo político, teniendo como referencia la economía (Carreón et al., 2019). Un aspecto que no se ha pronunciado como uno de los mayores efectos es la salud de las sociedades, a pesar de que hay múltiples estudios sobre la toxicología y reportes epidemiológicos; no se pone de manifiesto el hecho de que se tiene que tomar acciones a muy corto plazo, ya que la aparición de enfermedades cada vez es más frecuente y sus costos son más elevados, por la complejidad y duración de los tratamientos.

En un estudio realizado en los Estados Unidos por Limaye et al. (2019) en el año 2012 se indica que, el costo de la salud por eventos relacionados con el cambio climático alcanzó un estimado entre 2.7 a 24.7 billones de dólares, que incluyen desde la morbilidad hasta los gastos funerarios, cifra que posiblemente pudiera haber sido menor, si se hubiera tomado las acciones para acelerar la transición energética y reducir las actividades industriales o ganaderas que generan una huella de carbono sustancial.

Dentro de las afectaciones en materia de salud que han venido agudizando en los últimos años está la aparición de enfermedades respiratorias y cáncer, en las comunidades de productores de ladrillo, una actividad esencial en la economía para ciertas regiones en la república mexicana que, desafortunadamente, sigue siendo un proceso rústico y artesanal y, por esta razón, carece de procesos de ingeniería, con lo cual en el horneado de estos materiales se utiliza leña o materiales alternativos que se requiere que no afecten el costo de venta de sus productos. Al acudir a servicios médicos, muchos de los integrantes presentan severas afectaciones pulmonares y en los tractos respiratorios, con aparición de cáncer en varios de ellos. Toxicológicamente, las emisiones de la combustión de leña son precursores de estas enfermedades, pero los productores se resisten a aceptar que es por sus prácticas de trabajo y, en la mayoría de los casos continúan y agravan sus padecimientos (Secretaría de Estado para Asuntos Económicos, SECO, 2023).

El problema en estos grupos se agrava porque el proceso no está normado; es decir, las normas oficiales mexicanas no restringen los combustibles ni limitan las emisiones; esto es, no son monitoreados por las autoridades ambientales y, aunque son supervisados por los gobiernos municipales, estos no están facultados para restringirlos y, en la mayor parte de los casos, están ubicados en pequeñas poblaciones, lo que hace que sea más complejo su control (Romo et al., 2004) y, mucho menos, medir la huella de carbono que generan estos procesos, por lo que en los inventarios de emisiones no son considerados, por todo lo que circunda a estas comunidades. De esta forma se desprende como objetivo principal, obtener la huella de carbono de manera experimental, para tomar acciones en cuanto al proceso, los combustibles y las posibles medidas de higiene y salud que deben ser tomadas.

Huella de carbono

Al hablar de desarrollo, industria, comercio, servicios, actividades humanas, en términos ambientales nos referimos a que son susceptibles de afectar o modificar el medio que los rodea, ya sea por la producción de un residuo, una descarga de agua residual o una emisión contaminante a la atmósfera. Estas alteraciones se han ido estudiando y midiendo acorde con el tipo de agente nocivo; en el caso de la contaminación a la atmósfera, se ha caracterizado por el compuesto o elemento contaminante que se emite; de esta forma se ha generado normas para las fuentes de emisión para el caso de procesos industriales y, poder medir cuánta es la cantidad de emisiones; sin embargo, existen muchos procesos que, por no ser industriales, son monitoreados, como por ejemplo, las actividades ganaderas que generan metano (CH_4), un gas de efecto invernadero, o el uso de refrigerantes que emiten hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6), que no son medidos a través de estudios de emisiones como puede ser

una caldera o el motor de un automóvil, con lo que ha sido necesario establecer una referencia que pueda mostrar una equivalencia entre todos estos gases.

A partir del protocolo de Kioto se estableció este mecanismo equivalente de todos estos gases y se tomó como referencia el bióxido de carbono como elemento representativo, con lo cual se estableció las equivalencias en cada una de las emisiones en 'bióxido de carbono equivalente' para generar lo que llamamos 'huella de carbono'; es decir, la cantidad equivalente de GEI producido por la actividad, proceso o equipo industrial, como lo indica la Comisión Interdepartamental del Cambio Climático (2011).

El acuerdo internacional para medir el impacto del calentamiento global ha establecido como indicador, inicialmente, la temperatura global del planeta, seguida por la huella de carbono o la cantidad de emisiones de carbono equivalente, sin importar si es un equipo industrial o una actividad realizada la que emite los gases y, de esta forma, cuantificar las emisiones totales, como se hace en los inventarios, los cuales representan la situación en cuanto al impacto de las actividades de una empresa, un proceso o una actividad, inclusive de organizaciones, ciudades y hasta países.

La forma correcta para medir la huella de carbono es a partir de la obtención de la equivalencia de cada actividad o proceso, sumando cada una; es decir, existe un factor para los procesos como la producción de electricidad, la quema de combustibles, la degradación de materia orgánica como residuos de animales, la elaboración de ropa, la producción de acero o, asar una carne en una parrilla. Simplemente, teniendo la emisión del contaminante, por su factor obtenemos la equivalencia en dióxido de carbono (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, INECC, 2014).

En términos normativos, las fuentes de emisiones fijas y móviles que reconocen las autoridades mexicanas tienen un alcance sobre combustibles como la gasolina y el diésel para el parque vehicular, que es el caso de fuentes móviles y gas natural, gal Lp, diésel, gasóleo, combustóleo y carbón, para el caso de fuente fija.

En el caso de hornos productores de ladrillo, estos no entran en esta normatividad para el establecimiento de límites de emisión, por ser irregulares estas estructuras; es decir, no son equipos, son construidos artesanalmente, hay una gran variedad de combustible o mezclas que utilizan, por lo que no pasan por una revisión y, simplemente, son supervisados por los municipios, pero, aunque estén contaminando, no son sancionados; sin embargo, sí son susceptibles de medir su huella de carbón. Al tener un levantamiento de las cantidades de leña o combustible utilizado se puede utilizar la metodología de factores, si no se

tiene mediciones y, estimar las cantidades de emisión, como plantean Espíndola y Valderrama (2012).

Estas metodologías son muy relevantes, dado que no se invierte en un monitoreo y, proporcionan una huella de carbono o su impacto al medio ambiente. Desafortunadamente, los procesos en los hornos productores de ladrillo son una combustión de una eficiencia química muy baja por sus características de construcción y las formas como se realiza las quemas, por lo que es importante monitorear con equipos de medición, obtener la huella real y, partir de estos resultados para posibles modificaciones en los hornos, su construcción y operación (Averardo, 2009).

Situación actual de las ladrilleras

La industria de la construcción en México se ha desarrollado hasta alcanzar altos estándares en edificaciones de todo tipo, carreteras con concreto hidráulico con peraltes que permiten tener agarre al piso y alcanzar mayor velocidad, edificios con materiales más ligeros y con menor impacto al medio ambiente, en algunos casos reutilizables o reciclables, cimentaciones flexibles adaptables a los diferentes tipos de suelo, diferentes tipos de bloques para pared en basaltos con mayor resistencia, menor peso y costo, entre otros (Solminihac y Thenoux, 2011); hasta han aparecido propuestas de paredes hechas a base de botellas de PET y arreglos de materiales de segundo uso para sustituir paredes.

En el caso del ladrillo rojo, no ha habido avances sustanciales; su composición sigue siendo a base de arcillas y el proceso se sigue realizando por cocimiento en hornos artesanales hechos a mano, con poca ingeniería. Es una industria muy tradicionalista representada por grupos marginados que forman empresas familiares donde participan desde los niños, coincidiendo mayoritariamente en que el trabajo fue heredado. Las actividades son efectuadas en los traspatios de sus casas; almacenan sus materiales, elaboran el troquelado de la arcilla a mano sin maquinaria, como se ve en la Figura 1; construyen el horno y almacenan su producto terminado y se estiba, razón por la cual este tipo de negocios tiene muy baja rentabilidad y la expectativa de crecimiento es muy limitada.

Figura 1

Proceso manual de fabricación de ladrillo rojo



Nota. Parque ladrillero Tlajomulco (2017).

Un aspecto que se acentúa cada vez más en estos grupos es la salud, al realizar la ‘quema de los hornos’, término con el que designan los productores al cocimiento del ladrillo. Las emisiones que generan son ilimitadas; primero, por el uso de leña y desperdicios de madera como la melanina, que es madera recubierta con polímeros que, al entrar a las improvisadas cámaras de combustión, generan una gran cantidad de hollín, gases contaminantes y tóxicos que rebasan cualquier norma.

Desafortunadamente, los productores y sus familias se ven expuestos y aparecen enfermedades respiratorias severas y hasta cáncer; esta situación es parte de su vida y, como no existe una norma que les limite las emisiones, sigue siendo una práctica normal. La producción de ladrillo rojo, al ser una actividad con escasa ingeniería, presenta grandes deficiencias en sus procesos, inicialmente por los combustibles utilizados; generalmente, leña, madera, aserrín y, desafortunadamente, mezclas de todo tipo de residuos que visualizan a este sector como uno de los más agresivos con el medio ambiente (Romo et al., 2004). Las emisiones a la atmósfera van desde las partículas de hollín, el monóxido de carbono CO, bióxido de carbono CO₂ y, compuestos muy ofensivos, como los óxidos de nitrógeno NO_x y las dioxinas.

Si bien este sector está supervisado por los municipios, no se observa un carácter legal para limitar las emisiones y, en consecuencia, opera sin restricciones, salvo contingencias que las autoridades indican. En Jalisco y Guanajuato se ha promovido normas para la elección del sitio, como la NAE-SEMADET-002-2018 (Gobierno del Estado de Jalisco, 2020). En el caso de Guanajuato, se indica las especificaciones que debe tener el horno (NTE-IEG-001/98, Gobierno del Estado de Guanajuato, 1998), pero los productores, prácticamente hacen caso omiso a esta base regulatoria, a pesar de que en algunos casos están localizados muy cercanos a colonias altamente pobladas.

Dado que, en general, los productores carecen de maquinaria para mover sus materias primas, las mueven con palas, realizan la preparación y las mezclas a mano o, con los pies; troquelan uno a uno los ladrillos para colocarlos a secar y, de igual forma, construyen el horno, sin ninguna base constructiva, como se aprecia en la Figura 2. Tampoco se evidencia conocimiento sobre los procesos de transferencia de calor; una vez que han hecho la quema, descargan el horno y cargan los camiones, para que su venta se realice en vía pública (Averardo, 2009).

La problemática ha sido estudiada y presentada en diferentes foros, por ser instalaciones altamente contaminantes y con baja disponibilidad para cambios en los procesos; sin embargo, los hornos siguen operando, por la importancia en la economía de los municipios, que genera una cantidad considerable de empleos y porque forma un eslabón fundamental en la cadena productiva de la industria de la construcción. De ahí deriva la relevancia de no tener cuantificada su huella de carbón y no tener certeza en las emisiones, lo cual contribuye al calentamiento global y afecta al medio ambiente, especialmente a la salud de los propios gremios y de los habitantes que rodean a estos lugares (Naciones Unidas, 2015).

Al revisar los antecedentes de operación de las ladrilleras, se aprecia que se ha hecho intentos de regular las operaciones, se ha desarrollado estudios toxicológicos y de salud que han mostrado la agresividad de las emisiones sobre los habitantes más vulnerables, como los niños y los ancianos, por lo que es necesario determinar las emisiones de forma experimental, calcular la huella de carbono para un horno típico y, generar propuestas para el estudio y diseño de nuevos modelos de hornos más eficientes y, sobre todo, menos contaminantes.

Figura 2

Horno ladrillero típico



Nota. Parque ladrillero Tlajomulco de Zuñiga (2022).

Material y método

Actualmente, se tiene registro de diferentes estudios técnicos y sociales donde se coloca como foco central al sector ladrillero, por sus múltiples y complejas problemáticas económicas, ambientales y sociales (Romo et al., 2004). En los aspectos de impacto al cambio climático, no se evidencia antecedentes para la determinación de la huella de carbono, por lo que se parte de la base de convivencia con estos grupos, caracterizando las operaciones, la logística de su materia prima, la construcción del horno, el acomodo de las cámaras de combustión y, el tipo y cantidad de combustible. El trabajo se realizó en el municipio de Tlajomulco de Zuñiga, Jalisco, México, donde es propia la actividad de producción de ladrillo rojo, y representativa de la economía para muchas familias que habitan en estas colonias. Se seleccionó a una ladrillera típica, donde la familia es parte de la fuerza trabajadora y opera hornos desde hace más de 50 años, con las características que se muestra en la Tabla 1.

Se presentó a los productores, una semblanza de los trabajos y la importancia del estudio, en términos de conocer de manera experimental las cantidades de emisiones que producen y algunas condiciones atmosféricas que están ligadas a la quema, como la dirección y la velocidad del viento.

Tabla 1

Características del horno productor de ladrillo rojo

Tipo	Horno productor de ladrillo rojo
Capacidad	20 000 unidades
Geometría	Prismática irregular de 8m (frente) x 9 m (fondo) 3.2 m (altura) medidas promedio
Combustible	Leña, residuos de melanina, trapos y estopas con aceite quemado
Chimenea	Sin chimenea
Tiempo de quema	Cinco días
Operación	Manual
Materia prima	Arcilla, cartón, aserrín
Cámaras	Tres alimentadores para combustión

El procedimiento se planteó a partir de la medición de condiciones atmosféricas puntuales alrededor del horno, midiendo las concentraciones de los gases y los parámetros atmosféricos, como se ve en las figuras 3 y 4.

Figura 3

Monitoreo de gases de la combustión ladrillera Tlajomulco



Figura 4

Monitoreo de gases. Mediciones directas



Lamentablemente, las normas oficiales mexicanas no aplican en sus métodos y técnicas, por ser una quema a cielo abierto, considerando que es una fuente fija, por lo que se optó por identificar diferentes puntos para medir las concentraciones, así como realizar adaptaciones para que los analizadores pudieran medir las altas concentraciones. La Tabla 2 indica los registros.

Tabla 2

Registro de monitoreo a horno tradicional de ladrillo

Contaminante	Concentración ppm	Norma ppm	Referencia	Observación
Monóxido de carbono CO	1875	500	Fuente fija a combustible fósil	Se rebasa norma de referencia
Bióxido de carbono CO ₂	843	20	Fuente móvil a gasolina	Se rebasa norma de referencia
Compuestos de azufre S	1403	2200	Fuente fija a combustible fósil	Se rebasa norma de referencia
Partículas	820	450	Fuente fija a combustible fósil	Se rebasa norma de referencia

Tanto la norma NAE-SEMADET-002/2018 (Gobierno del Estado de Jalisco, 2020), como la NTE-IEG-001/98 (Gobierno del Estado de Guanajuato, 1998), indican características de ubicación y combustibles a utilizar que desgraciadamente deja a criterio del productor lo que utiliza de combustible, por lo que lo vuelve más complejo el estandarizar la medición a otros hornos por el tamaño y la configuración. De esta forma se tendría que monitorear cada horno, para saber qué cantidad de contaminantes se está emitiendo a la atmósfera, lo que vuelve complejo determinar la huella de este sector y, sobre todo, tener un control más estricto sobre las quemas y los periodos en los cuales deben hacerlo, aunado a que muchos de estos hornos están fuera de supervisión por la lejanía en donde los construyen. Al evaluar las concentraciones se obtuvo indirectamente la huella de carbono, basándonos en las metodologías de Espíndola y Valderrama (2012) y los factores del INECC (2014), obteniendo:

$$\text{Huella} = 840 \text{ Kg}_{\text{CO}_2\text{equiv}}$$

Resultados

La cantidad de emisiones a la atmósfera está cerca de una tonelada de GEI vertidos a la atmósfera en la producción de ladrillo en un horno tradicional con cargas aproximadas de 20 mil unidades. Otro aspecto a resaltar es que los diferentes tipos de gases emitidos son más agresivos al ambiente y a la salud, como las dioxinas. Al analizar el proceso, se identifica que es un horno sin geometría y sin aislamientos, por lo que la pérdida de calor en las paredes y superficie es elevada, registrando temperaturas de hasta 600 °C en su perímetro; no hay una geometría definida para un proceso a alta temperatura; los tiros de inyección de aire no generan succión por convección natural (Márquez, 2005). Algo que sobresale es que la leña es colocada en los tiros acorde con su tamaño; es decir, hay diferentes tamaños y, en algunos casos son enormes, lo que dificulta la combustión y la eficiencia, desde el punto de vista químico, disminuye; de esta manera, como indica Averardo (2009), hay una gran cantidad de deficiencias en el proceso de cocido del ladrillo artesanal, que se ve reflejado en la gran producción de emisiones contaminantes, como queda evidenciado en el monitoreo.

La referencia de una fuente fija proporciona una correspondencia de cuántas veces el horno duplica o multiplica la cantidad de emisiones. De aquí se parte para caracterizar la enorme huella de carbono que tiene este tipo de procesos y, que debe haber mayor supervisión, por la afectación de los productores y sus familias.

Conclusiones

El sector ladrillero es una parte fundamental de la economía de la construcción para las familias y el desarrollo de municipios; genera una gran cantidad de empleos y estimula las cadenas productivas. Los grupos marginados han encontrado en este oficio, una forma de vida y subsistencia, razón por la cual se asientan en las orillas de los municipios o en lugares de poco desarrollo urbano, lo que hace que no exista supervisión en esquemas de seguridad, cuidado al medio ambiente y efectos sobre la salud. Son grupos con poca o escasa capacitación, cuyo principal conocimiento es el heredado por su anterior generación, que lo vuelve una actividad tradicionalista y artesanal y, deriva en prácticas poco eficientes para realizar la manufactura y el cocimiento del ladrillo rojo.

Las fuentes bibliográficas coinciden en la complejidad de abordar los temas sociales, pero, esencialmente, los de salud y medio ambiente de los productores de ladrillo, quienes presentan poca apertura a capacitarse y evolucionar en sus procesos, por lo que la huella de carbono genera una alta emisión y resulta complejo que puedan entender la agresividad de los contaminantes, a pesar de que hay registros y evidencias de severas enfermedades respiratorias.

Las metodologías para determinar la huella de carbono resultan un instrumento de evaluación del impacto de los procesos; sin embargo, resulta vital efectuar mediciones directas en los procesos, ya que el factor no considera la gran cantidad de situaciones que afectan el proceso, como el hecho de que el horno no tiene geometría definida, hay enormes pérdidas por transferencia de calor, los venteos de aire resultan poco eficientes y disminuye el rendimiento de la combustión y, los materiales utilizados como combustibles generan enormes y agresivas cantidades de emisiones contaminantes.

Al analizar los procesos de esta industria ladrillera tradicional se aprecia que se requiere reconvertir sus métodos de operación a esquemas eficientes y sustentables, aplicando ingeniería de procesos, instrumentación y controles ambientales que permitan reducir el impacto a la salud de las personas, al medio ambiente e integrar estos procesos a los inventarios de emisiones que hagan posible tener una mayor visión en el cambio climático del planeta.

Referencias

- Averardo, M. (2009). El ladrillo. Orígenes y desarrollo. <https://arquitectnologicofau.files.wordpress.com/2012/02/el-ladrillo-2009.pdf>
- Carreón, S., Celada, A. T. y Salcido V. (2019). El cambio climático, una realidad. *Ciencia, Tecnología y Sociedad*, 1(4), 44-48.
- Comisión Interdepartamental del Cambio Climático. (2011). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Versión 2011*. Oficina Catalana de cambio climático.
- Espíndola, C. y Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: Conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Información Tecnológica*, 23(1), 163-176. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- Gobierno del Estado de Guanajuato. (1998). Norma Técnica Ecológica NTE-IEG-001/98. https://transparencia.guanajuato.gob.mx/biblioteca_digital/docart10/200804281656550.Norma%20Tecnica%20Ladrilleros.pdf
- Gobierno del Estado de Jalisco. (2020). Normas Ambientales Estatales. NAE – SEMADET-002/2018. <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/transparencia/informacion-fundamental/13080>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Limaye, V. S., Max, W., Constible, J., & Knowlton, K. (2019). Estimating the health-related costs of 10 climate-sensitive U.S. events during 2012. *GeoHealth*, 3(9), 245-265. <https://doi.org/10.1029/2019GH000202>
- Márquez, M. (2005). *Combustión y quemadores*. Editorial Marcombo.
- Naciones Unidas. (2015). Convención Marco sobre el Cambio climático. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/l09s.pdf>
- Romo, M. L., Córdova, G. y Cervera, L. E. (2004). Estudio urbano-ambiental de las ladrilleras en el municipio de Juárez. *Estudios Fronterizos*, 5(9), 9-34. <https://doi.org/10.21670/ref.2004.09.a01>
- Secretaría de Estado para Asuntos Económicos (SECO). (2023). EELA. Programa de eficiencia energética en ladrilleras de América Latina para mitigar el cambio climático. <https://www.cooperacionsuiza.pe/mas-ladrillos-menos-co%E2%82%82/>
- Solminihaç, H. y Thenoux, G. (2011). *Procesos y técnicas de construcción* (5.ª ed.). Ediciones Universidad Católica de Chile.

Capítulo 3.

Diseño de una caja de emisividad portátil

Jimmy Aguilar
Jairo Valdés
Francisco Hernández

Cítese como: Aguilar, J., Valdés, J. y Hernández, F. (2024). Diseño de una caja de emisividad portátil. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 37-50). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c421>

Resumen

El objetivo de este trabajo es proponer el diseño de la arquitectura electrónica y mecánica de una caja de emisividad portátil para la caracterización de la emisividad de superficies vegetales. La metodología combina los atributos de la caja Buettner-Kern (1965), conocida por su simplicidad y portabilidad, con el protocolo de mediciones descrito por Sobrino y Caselles (1993).

La combinación de estas metodologías permite el uso de termómetros digitales más comunes y baratos, en comparación con los sensores de potencia radiante utilizados en el método Buettner-Kern. Los resultados obtenidos a partir de este proyecto constituyen el insumo para la manufactura de un dispositivo económico, portable y de fácil construcción, que permitirá alimentar un banco de información con las propiedades de emisividad de las especies vegetales que se encuentra en el país.

Palabras clave: diagnóstico ambiental; cambio climático; teledetección; emisividad

Introducción

La emisividad (ϵ) es una propiedad espectral que describe la eficiencia a la cual un objeto puede emitir radiación electromagnética en función de la temperatura del objeto (T). Esta propiedad se define matemáticamente, como la relación entre la radiación emitida por un cuerpo real respecto a la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura (Modest y Mazumder, 2021). Los valores que puede adoptar este parámetro varían en el rango de $0 \leq \epsilon \leq 1$. Si se dispone de información precisa de la ϵ de la vegetación y tipo de suelo, es posible calcular con precisión la temperatura de la superficie terrestre (TST, por sus siglas en inglés) a partir de mediciones de radiancia en el infrarrojo térmico (RIT, por sus siglas en inglés) (Mira et al., 2009). Arp y Phinney (1979) determinaron que, una variación de la ϵ de 0.05 genera un error de aproximadamente 3.7 K en la determinación de la temperatura de la TST (a una banda espectral de $10.5 \mu\text{m}$ hasta $12.5 \mu\text{m}$ y para una RIT de aproximadamente 300 K).

La absorción de radiación solar por la atmósfera y el suelo terrestre es un factor determinante en las tendencias climáticas. Tanto la transferencia de energía radiativa como la no radiativa entre la superficie, la atmósfera y el espacio, controlan el cambio climático (Salhi et al., 2021). En tiempos recientes, las aplicaciones de teledetección han desempeñado un papel clave en la adquisición de datos sobre el estado de las coberturas y, han facilitado la investigación de su conexión con la temperatura radiante. Se sostiene, incluso, que los sensores remotos infrarrojos térmicos son la única opción disponible para recopilar datos de temperatura a lo largo de vastas áreas de la TST, con diversas resoluciones espaciales y temporales (Wei et al., 2021). La temperatura de la TST constituye un indicador clave sobre las modificaciones ambientales vinculadas a las actividades humanas (Laguë et al., 2019).

El conocimiento del espectro de ϵ terrestre es un parámetro esencial para el desarrollo de estudios geográficos sobre materiales geológicos y de cobertura vegetal que utilizan las diferencias presentes en las características ópticas dependientes de cada material (Mira et al., 2009). Sin embargo, el reemplazo de la vegetación puede influir en diversos aspectos del equilibrio radiativo, como el albedo y la absorción de radiación solar, así como en la transferencia de calor y humedad entre la superficie y la atmósfera (Langsdale et al., 2020). Las modificaciones en la cobertura de la tierra, resultado de acciones como la tala de bosques, la expansión urbana y las prácticas agrícolas, forman parte de los fenómenos asociados con el cambio global. Estas alteraciones pueden tener efectos adversos en las propiedades biofísicas de la TST y en su interacción con la atmósfera (Quispe y Révolo, 2020).

En regiones áridas, especialmente, aún existe una incertidumbre relativamente alta en los valores de ϵ de la TST, la cual limita el grado de precisión con la que puede ser determinada la temperatura superficial de la tierra mediante el uso de

aplicaciones satelitales (Ermida et al., 2023). La obtención de datos de ϵ es clave para la generación de registros climáticos basados en la TST (Mulford et al., 2019).

Por lo anterior, la determinación de la ϵ de especies vegetales y suelos locales se convierte en un elemento crucial en investigaciones relacionadas con el análisis, la deforestación, monitoreo frecuente de parques nacionales, estudios sobre reemplazo de cultivos, desastres naturales y, los efectos del cambio climático.

Existen múltiples estudios que presentan diferentes métodos para la medición de la ϵ térmica. Entre ellos, las variantes de una y dos tapas del método de la caja de ϵ , utilizado para determinar la ϵ de banda ancha en el infrarrojo de onda larga (LWIR, por sus siglas en inglés) de una superficie Buettner y Kern (1965), el uso de espectrómetros infrarrojos de transformada de Fourier (FITR) portátil para aplicaciones en campo que permiten estimar la ϵ espectral en el LWIR de diferentes tipos de superficie (Korb et al., 1996), la aplicación de algoritmos de separación de temperatura y emisividad (TES, por sus siglas en inglés) para radiómetros de emisión térmica y reflectancia (ASTER, por sus siglas en inglés) con mediciones de radiancia *in situ* obtenidas mediante radiómetros multibanda (Jiménez-Muñoz y Sobrino, 2006), la utilización de un instrumento novedoso que combina una fuente de radiancia TIR oscilante con procesamiento de señales digitales para determinar la ϵ efectiva de banda de un radiómetro (Göttsche et al., 2018) y la utilización de cámaras térmicas de microbolómetro en vehículos aéreos no tripulados (UAVs) mediante la captura de información térmica en configuraciones de cuerpo negro o radiométricas (Torres-Rua et al., 2019). El método implementado en este documento combina los atributos de la caja de Buettner y Kern (1965), conocida por su simplicidad y portabilidad, con el protocolo de mediciones descrito por Sobrino y Caselles (1993).

El método de la caja de ϵ fue desarrollado por primera vez por Buettner y Kern (1965) como un dispositivo de campo capaz de medir las emisividades infrarrojas de superficies terrestres, a diferencia de los métodos convencionales llevados a cabo dentro de laboratorio durante la época. Su concepción fue motivada por la gran cantidad de información radiométrica disponible en ese momento, la cual era capturada mediante el programa de misiones satelitales desarrollado por la NASA denominado TIROS (*Television Infrared Observation Satellite*). Estos satélites requerían de datos precisos de ϵ de superficies terrestres para realizar evaluaciones reales sobre el estado de la TST (Buettner y Kern, 1965). En ese mismo año se probó técnicas infrarrojas para medir la temperatura superficial, con el fin de emplearlas en aplicaciones meteorológicas. Dentro de los métodos utilizados se encuentra la caja de ϵ , en su variante de una sola tapa, para determinar la ϵ de varios suelos de Arizona. La principal ventaja de la variante de la caja de ϵ de dos tapas es poder eliminar el efecto de la radiancia proveniente del entorno en sí mismo, ya que este método permite aislar la muestra gracias al entorno aislado provisto por las superficies altamente reflectantes dentro de la caja. Por su parte, el método de una

sola tapa requería realizar una lectura con el radiómetro, apuntando directamente hacia el cielo, generando mayores incertidumbres en las mediciones.

La finalidad de este proyecto consiste en proponer el diseño de la arquitectura electrónica y mecánica de una caja portátil para la medición de la ϵ de superficies vegetales. Esta nueva propuesta posibilita la utilización de termómetros digitales más accesibles y económicos, en comparación con los sensores de potencia radiante empleados en el método Buettner y Kern. Los resultados derivados de este estudio constituyen la base para la creación de un dispositivo asequible, portátil y de construcción sencilla, destinado a contribuir a una base de datos con las propiedades espectrales de las especies vegetales presentes en la región.

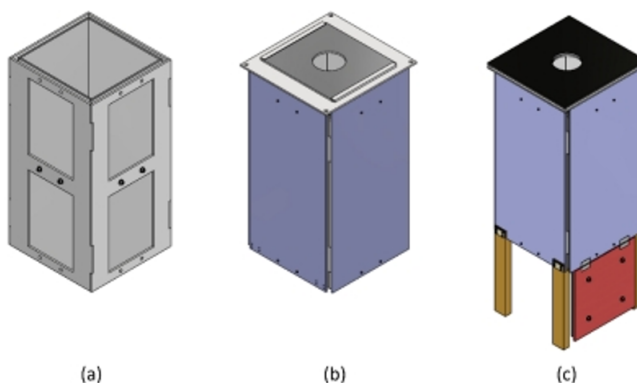
Rediseño de la caja de emisividad

El objetivo principal de esta propuesta es presentar el diseño electrónico y mecánico de una caja de ϵ portable y de fácil construcción para realizar mediciones en campo, utilizando cualquiera de las versiones del método de las dos tapas. Este nuevo diseño es de un menor tamaño (aproximadamente 30 cm de alto \times 15 cm de ancho \times 15 cm de largo); incluye un controlador para el sistema de temperatura, un termómetro infrarrojo y un sistema de adquisición de datos que permite realizar lecturas en tiempo real durante las mediciones en campo.

La Figura 1(a) muestra el modelo CAD (Diseño asistido por computador) del núcleo de la caja de ϵ propuesta. Este componente conforma el chasis integral de todo el sistema al cual se unirá el resto del ensamblaje. Su diseño se compone de piezas tipo macho y hembra que encajan entre sí y poseen secciones huecas que no comprometen la integridad estructural de la caja y que ayudan a ahorrar en costos de material. Dentro de este chasis se puede observar las paredes internas reflectantes, que están unidas al chasis mediante tuercas remachadas y tornillos de cabeza hexagonal.

Figura 1

Núcleo de la caja de emisividad propuesta



Debido al uso de un chasis hueco, para evitar la contaminación del interior de la caja, también se debe agregar paredes externas (de color púrpura), como se muestra en la Figura 1(b). Estas paredes están unidas por el mismo tipo de ensamblaje de tuerca remachada y tornillo de cabeza hexagonal. El esquema muestra dos soportes laterales tipo canal que permiten el deslizamiento de la tapa fría superior.

Finalmente, la Figura 1(c) muestra el ensamblaje completo de la caja. En ella se puede identificar la tapa caliente negra, que se coloca sobre dos soportes tipo canal que van anclados mediante pines extruidos. En la zona inferior se observa que la caja descansa sobre cuatro patas, las cuales disponen espacio para una tapa fría inferior. Esta tapa fría inferior actúa como una puerta plegable gracias a bisagras pivotadas en una de las paredes externas y, será la que permitirá medir la ϵ en la versión de dos tapas reportada por Sobrino y Caselles (1993).

El protocolo de mediciones de este diseño, el cual se basa en la metodología propuesta por Sobrino y Caselles (1993), aprovecha el cambio en la lectura de temperatura registrada de la muestra cuando se cambia la temperatura de la tapa superior para realizar las mediciones. El procedimiento para la determinación de la ϵ de una muestra requiere de tres lecturas del termómetro infrarrojo: la primera de ellas usando la tapa caliente (L_1), otra usando la tapa fría (L_2) y otra nuevamente con la tapa caliente, pero, en lugar de colocar la muestra en la parte inferior de la caja, se reemplaza por la tapa fría (L_3).

La expresión que describe la radiancia L_1 registrada por el radiómetro cuando ve la muestra a través del agujero de la tapa caliente, es descrita por:

$$L_1 = \epsilon_s B_s + (1 - \epsilon_s)[\epsilon_c B_c F + \epsilon_h B_h (1 - F \epsilon_c) + L_1 (1 - \epsilon_h)(1 - F \epsilon_c)] \quad (1)$$

En adelante los subíndices “s”, “c”, “h” y “w” están referidos a la muestra (s), la tapa fría (c), la tapa caliente (h) y las paredes de la caja (w), respectivamente. En este caso ϵ_s denota la ϵ de la muestra, ϵ_c es la ϵ de la tapa fría y ϵ_h es la ϵ de la tapa caliente. En la ecuación anterior, la ϵ de las paredes ha sido asumida como $\epsilon_w = \epsilon_c$ debido a que se usa el mismo material de la tapa fría para las paredes. Así mismo, dado que tanto la tapa fría como las paredes se encuentran a temperatura ambiente, entonces $B_c = B_w$. De forma análoga, las variables B_s , B_c y B_h representan el valor integrado de la radiación espectral de cuerpo negro a las temperaturas T_s , T_c y T_h ; F es el factor geométrico de intercambio de radiación (o factor de visión), el cual considera la fracción de radiación que es eyectada por las paredes reflectantes

y que incide sobre la muestra. En la ecuación 1, el primer término representa la radiancia emitida por la muestra, y el segundo término es la radiancia que alcanza la muestra. De manera similar, L_2 y L_3 pueden ser determinados como:

$$L_2 = \varepsilon_s B_s + (1 - \varepsilon_s)\{\varepsilon_c B_c [1 + F(1 - \varepsilon_c)] + L_2(1 - \varepsilon_c)(1 - F\varepsilon_c)\} \quad (2)$$

$$L_3 = \varepsilon_s B_s + (1 - \varepsilon_s)[\varepsilon_c B_c F + \varepsilon_h B_h(1 - F\varepsilon_c)] + L_3(1 - \varepsilon_h)(1 - F\varepsilon_c) \quad (3)$$

...donde L_2 corresponde a la medición realizada por el sensor infrarrojo observando la muestra a través del agujero de la tapa fría, y L_3 es la medición observando la tapa fría a través del agujero en la tapa caliente.

Al restar la ecuación 2 de la ecuación 3 y, considerando que L_2 se realiza cuando se alcanza el equilibrio térmico (lo que implica que $B_c = B_s$), junto con manipulaciones algebraicas adicionales, finalmente se obtiene la expresión empleada para determinar las emisividades en la versión de Sobrino y Caselles (1993) en la variante de las dos tapas:

$$\varepsilon_s = 1 - \frac{L_1 - L_3}{(1 - F\varepsilon_c)[(L_1 - L_2) + \varepsilon_h(kL_3 - L_1)]} \quad (4)$$

...donde k está dado por:

$$k = \left\{ \frac{\varepsilon_c(B_c/B_h)[1 + F(1 - \varepsilon_c)]}{1 - (1 - \varepsilon_h)(1 - \varepsilon_c)(1 - F\varepsilon_c)} + \frac{\varepsilon_h(1 - \varepsilon_c(1 - F\varepsilon_c))}{1 - (1 - \varepsilon_h)(1 - \varepsilon_c)(1 - F\varepsilon_c)} \right\}^{-1} \quad (5)$$

En resumen, el procedimiento de medición consiste en medir primero L_2 , lo cual debe hacerse cuando se alcanza el equilibrio térmico, y luego continuar rápidamente registrando L_1 y, finalmente, L_3 .

Una simplificación adicional que debe ser considerada es, que el termómetro infrarrojo registra temperatura, mas no radiancia. Por consiguiente, las lecturas de temperatura deben ser correlacionadas con cada valor de L_1 , L_2 y L_3

Dentro del mismo trabajo de Sobrino y Caselles (1993) se emplea un modelo ajustado, de la forma:

$$L \approx aT^b \quad (6)$$

...donde los valores de a y b dependen de las longitudes de onda que se pretende registrar:

Tabla 1

Valores de a y b para diferentes longitudes de ondas y para las temperaturas de campo más comunes (de 300 a 340 K)

Longitud de onda (μm)	a ($\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-b}$)	b	ΔT (K)
8 – 14	3.0783×10^{-9}	4.3400	0.16
10.5 -12.5	6.5850×10^{-9}	4.0161	0.17
10.5 – 11.5	1.4159×10^{-9}	4.1697	0.17
11.5 – 12.5	8.2751×10^{-9}	3.9486	0.17

Nota. ΔT es el error obtenido cuando se usa la simplificación de $L \approx aT^b$.

Diseño del módulo de radiometría y del sistema de calefacción

A continuación, se presenta los elementos que componen el sistema electrónico de medición propuesto:

- **Termómetros infrarrojos MLX90614:** proporcionan mediciones de temperatura sin contacto, donde el valor medido es un promedio de todos los objetos dentro del campo de visión del sensor.
- **Termopar MAX6675:** obtiene mediciones de temperatura basadas en la diferencia de voltaje que existe entre dos conductores.
- **Calentadores:** su objetivo es mantener la temperatura de la tapa caliente a un valor constante.
- **Pantalla:** utilizada para visualizar información sobre el proceso de medición y los valores de temperatura recuperados.
- **Tarjeta SD:** guarda los valores de temperatura en cada punto, para su posterior procesamiento.
- **Botonera:** permite la interacción entre el usuario y la pantalla, facilitando el control y la configuración del sistema.

- **Batería de 5V:** suministra energía a los dispositivos de menor consumo energético del sistema.
- **Batería de 12V:** suministra energía a los dispositivos de mayor consumo energético del sistema.
- **Módulo ESP32:** actúa como el controlador principal del sistema, gestionando todas las operaciones y funciones del sistema de medición de ϵ .

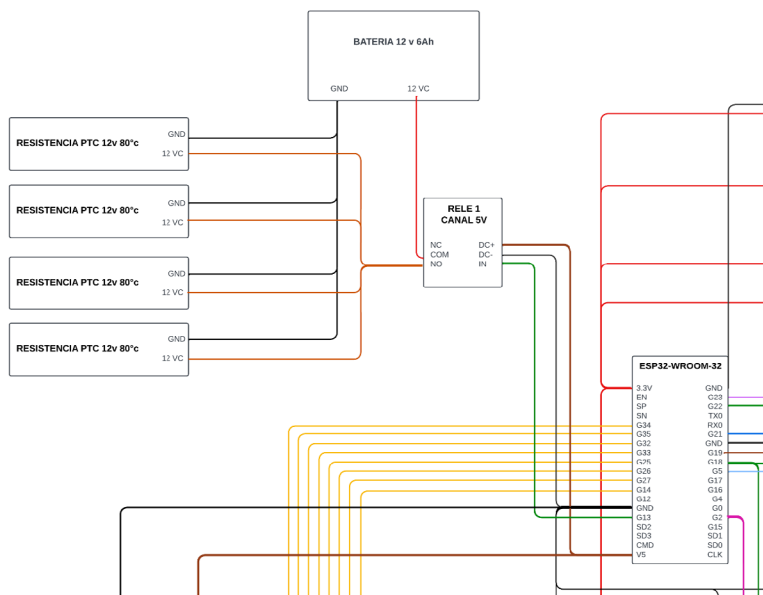
Con el fin de facilitar la comprensión de las funciones de este sistema, los principales módulos son divididos en secciones en un esquema electrónico y, explicados por separado:

Módulo de calefacción

El esquema mostrado en la Figura 2 ilustra la conexión de un módulo ESP32 a cuatro calentadores a través de un relé de un solo canal, donde todos son alimentados por una fuente de 12V. En primer lugar, se puede observar cómo la fuente de 12V es la principal fuente de alimentación de todo el circuito. Por otro lado, el módulo ESP32 actúa como el controlador principal y está conectado a través de sus pines GPIO (entrada/salida de propósito general) a los pines del relé que, a su vez, controlarán los calentadores. Por lo general, este módulo se conecta a GND (tierra) y a 3.3 o 5V, dependiendo de los requisitos de voltaje.

Figura 2

Esquema electrónico del Módulo de Calefacción



Además, el relé de un solo canal cumple la función de un interruptor controlado electrónicamente que permite encender/apagar los calentadores según las

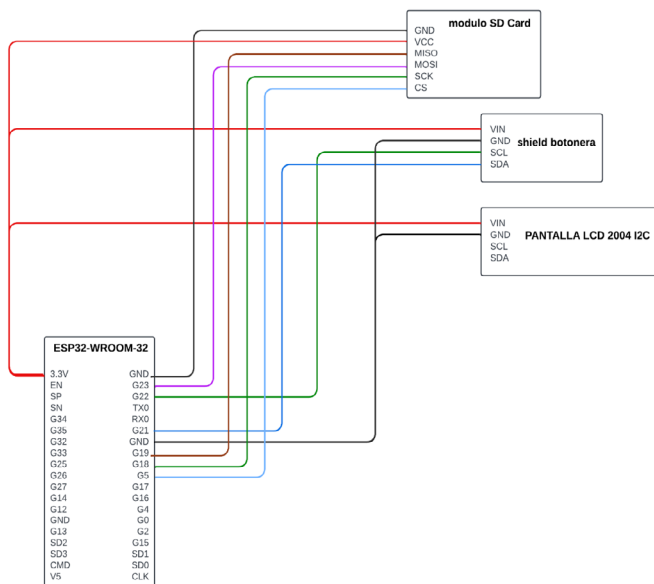
instrucciones del módulo ESP32. El relé está conectado al módulo ESP32 a través de los pines GPIO y se alimenta con 5V provenientes del propio ESP32, aunque también podría alimentarse mediante una fuente externa. La bobina del relé controla su interruptor y es capaz de regular la corriente y voltaje adecuado para los calentadores. Nuevamente, cada calentador está conectado al relé y a la fuente de 12V, donde el relé permite encender/apagar cada calentador por separado.

Módulo de interfaz usuario

El Módulo de Interfaz de Usuario (Figura 3) es controlado gracias al módulo ESP32, junto con una pantalla LCD 2004 y una botonera, utilizando el protocolo I2C (*Inter-Integrated Circuit*). El módulo ESP32 es responsable de comunicarse con la pantalla LCD y la botonera, dictando la lógica de la interacción de dichos componentes. Por otro lado, la pantalla LCD 2004 es la encargada de permitir la visualización de datos, capaz de mostrar cuatro filas de 20 caracteres. El módulo ESP32 está conectado al módulo LCD mediante dos cables: uno destinado a ser utilizado como línea de datos en serie (*SDA, Serial Data*) y otro destinado como línea de reloj en serie (*SCL, Serial Clock Line*).

Figura 3

Esquema electrónico de la Interfaz de Usuario

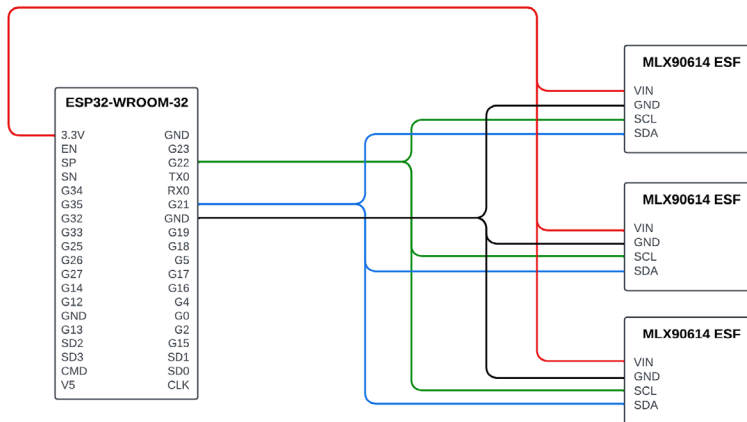


Módulo de Detección Infrarroja

El módulo de detección, como se muestra en la Figura 4, es el módulo central del dispositivo en cuanto a la medición de ϵ , la cual se logra mediante tres sensores de temperatura infrarrojos MLX90614 utilizando comunicación I2C.

Figura 4

Esquema electrónico del sensor infrarrojo



Los MLX90614 son sensores de temperatura infrarrojos de detección remota. Cada uno de ellos está conectado al bus I2C y se comunica con el microcontrolador ESP32, de modo que cada uno tiene su propia dirección única en el bus I2C, permitiendo que el ESP32 se comunique con cada uno de ellos de manera individual. El ESP32 puede recuperar datos de temperatura de cada sensor y procesar dichos datos según considere necesario.

Módulo de Termopares

La Figura 5 muestra la conexión de ocho **módulos MAX6675** al ESP32, donde **cada uno de ellos sostiene un termopar de tipo K**. Cada módulo está compuesto por cinco pines: los pines **GND** (tierra), **V_{cc}**, **SO**, **SCK** y **CS**. Los pines **GND** están conectados al mismo punto, mientras que los pines **V_{cc}** son alimentados con 3.3V. Los pines **SO** están conectados entre sí y hacia el pin **G2**, de manera similar para los pines **SCK**, pero, conectados al pin **G18** del ESP32. Los pines **CS** son los que permiten la lectura individual de la temperatura de cada termopar de manera autónoma.

Conclusiones

La falta de datos precisos sobre la ϵ de especies vegetales y suelos locales se revela como una limitación significativa en el análisis de fenómenos cruciales como la deforestación, el monitoreo frecuente de parques nacionales, estudios sobre reemplazo de cultivos, desastres naturales y los efectos del cambio climático. La ϵ , como propiedad espectral clave, desempeña un papel fundamental en la precisión de la determinación de la temperatura de la TST a partir de mediciones de radiancia en el RIT. Diversas investigaciones han destacado la importancia de este parámetro para entender y abordar fenómenos ambientales y climáticos. Sin embargo, la incertidumbre en los valores de ϵ , especialmente en regiones áridas, limita la precisión de las aplicaciones satelitales y la generación de registros climáticos basados en la TST. La adquisición de datos de ϵ se presenta como una necesidad imperante para mejorar la comprensión y la capacidad predictiva en el estudio de las interacciones entre la TST y la atmósfera, siendo esencial para abordar los desafíos actuales asociados con el cambio global y sus impactos en el medio ambiente.

La clave de esta propuesta radica en su capacidad para mantener la precisión térmica esencial, al mismo tiempo que introduce mejoras sustanciales en la manejabilidad y eficiencia del dispositivo. La inclusión de un controlador de temperatura optimizado y un sistema de adquisición de datos en tiempo real añaden un nivel de sofisticación que no solo facilita el proceso de medición, sino que amplía las posibilidades de aplicación en terrenos diversos.

Al abordar las limitaciones identificadas en las metodologías previas de Buettner y Kern (1965) y Sobrino y Caselles (1993), este rediseño no solo supera obstáculos logísticos, sino que se erige como una herramienta más robusta y eficaz para la toma de mediciones en situaciones de campo. En última instancia, esta propuesta marca un avance significativo en la evolución de las cajas de ϵ , facilitando el camino para un uso más accesible y eficiente en contextos de investigación y monitoreo medioambiental.

Referencias

- Arp, G. K., & Phinney, D. E. (1979). The ecological variations in thermal infrared emissivity of vegetation. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19790024434>
- Buettner, K., & Kern, C. D. (1965). The determination of infrared emissivities of terrestrial surfaces. *Journal of Geophysical Research*, 70(6), 1329-1337. <https://doi.org/10.1029/JZ070i006p01329>
- Ermida, S. L., Hulley, G., Goettsche, F. M., & Trigo, I. F. (2023). A combined vegetation cover and Temperature-Emissivity Separation (V-TES) method to estimate land surface emissivity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 61, 1-18, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2023.3301615>
- Göttsche, F-M., Olesen, F. S., Poutier, L., Langlois, S., Wimmer, W., García-Santos, V., Cool, C., Niclòs, R., Arbelo, M., & Monchau, J-P. (2018). Report from the field inter-comparison experiment (FICE) for land surface temperature. https://www.researchgate.net/publication/327012568_Report_from_the_Field_Inter-Comparison_Experiment_FICE_for_Land_Surface_Temperature.
- Jiménez-Muñoz, J. C., & Sobrino, J. A. (2006). Error sources on the land surface temperature retrieved from thermal infrared single channel remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 27(5), 999-1014. <https://doi.org/10.1080/01431160500075907>
- Korb, A. R., Dybwad, P., Wadsworth, W., & Salisbury, J. W. (1996). Portable Fourier transform infrared spectroradiometer for field measurements of radiance and emissivity. *Applied Optics*, 35(10), 1679-1692. <https://doi.org/10.1364/AO.35.001679>
- Laguë, M. M., Bonan, G. B., & Swann, A. L. (2019). Separating the impact of individual land surface properties on the terrestrial surface energy budget in both the coupled and uncoupled land-atmosphere system. *Journal of Climate*, 32(18), 5725-5744. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0812.1>
- Langsdale, M. F., Dowling, T., Wooster, M., Johnson, J., Grosvenor, M. J., de Jong, M. C., Johnson, W. R., Hook, S., & Rivera, G. (2020). Inter-comparison of field- and laboratory-derived surface emissivities of natural and manmade materials in support of land surface temperature (LST) remote sensing. *Remote Sensing*, 12(24), 4127. <https://doi.org/10.3390/rs12244127>
- Mira, M., Schmugge, T., Valor, E., Caselles, V., & Coll, C. (2009). Comparison of thermal infrared emissivities retrieved with the two-lid box and the TES methods with Laboratory Spectra. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 47(4), 1012-1021. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2008901>

- Modest, M. F., & Mazumder, S. (2021). *Radiative heat transfer* (4th ed.). Academic Press.
- Mulford, R. B., Dwivedi, V. H., Jones, M. R., & Iverson, B. D. (2019). Control of net radiative heat transfer with a variable-emissivity accordion tessellation. *ASME, Journal of Heat Transfer*, 141(3), 032702. <https://doi.org/10.1115/1.4042442>
- Quispe, B. J. y Révolo, R. H. (2020). Temperatura superficial y estado de la vegetación del bosque de *Polylepis* spp, distrito de San Marcos de Rocchac, Huancavelica–Perú. *Enfoque UTE*, 11(3), 69-86. <https://doi.org/10.29019/enfoque.v11n3.592>
- Salhi, O., Diouri, M., Amine, M., Marsli, I., & Meziane, R. (2021). Estimation of absorptivity of Earth-atmosphere system over the MENA areas. *E3S Web of Conference*, 314, 03006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202131403006>
- Sobrinho, J. A., & Caselles, V. (1993). A field method for measuring the thermal infrared emissivity. *ISPRS, Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 48(3), 24-31. [https://doi.org/10.1016/0924-2716\(93\)90061-Q](https://doi.org/10.1016/0924-2716(93)90061-Q)
- Torres-Rua, A., Aboutalebi, M., Wright, T., Nassar, A., Guillevic, P., Higgs, L., Gao, F., Jim, K., Alsina, M. M., Coopmans, C. McKee, M., & Kustas, W. (2019). Estimation of surface thermal emissivity in a vineyard for UAV microbolometer thermal cameras using NASA HyTES hyperspectral thermal, Landsat and AggieAir optical data. *Proceedings of SPIE International Society of Optical Engineering*, 11008. <https://doi.org/10.1117/12.2518958>.
- Wei, J., Shi, Y., Ren, Y., Li, Q., Qiao, Z., Cao, J., Ayatombo, O. O., Yin, J., & Wang, G. (2021). Application of ground-based microwave radiometer in retrieving meteorological characteristics of Tibet Plateau. *Remote Sensing*, 13(13), 2527. <https://doi.org/10.3390/rs13132527>

Capítulo 4.

Teledetección en el análisis del cambio forestal de la zona protegida San Marcelino, El Salvador, Centroamérica

Daro Cristian Arias Jaco

Cítese como: Arias-Jaco, D. C. (2024). Teledetección en el análisis del cambio forestal de la zona protegida San Marcelino, El Salvador, Centroamérica. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 51-60). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c422>

Resumen

Se aborda el cambio en la cobertura forestal de la zona protegida San Marcelino, El Salvador, Centroamérica, particularmente donde se encuentran los vestigios de la erupción del antes volcán San Marcelino, ahora cerro San Marcelino. El Complejo San Marcelino, designado como Área Natural Protegida, forma parte del Sistema de Áreas Naturales Protegidas de El Salvador y abarca aproximadamente 1 612 hectáreas, según datos del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). El estudio tuvo como objetivo, analizar el cambio ambiental y forestal en esta zona, presentando un enfoque exploratorio que utiliza la teledetección y las imágenes del Sentinel-2. Se examina el comportamiento de las bandas espectrales y se construye índices de vegetación para entender mejor la evolución de la vegetación. El análisis se centra en los años 2018 a 2022 y se basa en el índice de vegetación NDVI (Diferencia Normalizada de Vegetación).

Palabras clave: Sentinel-2; cambio forestal; índices de vegetación; bandas de satélite; teledetección; impacto climático

Introducción

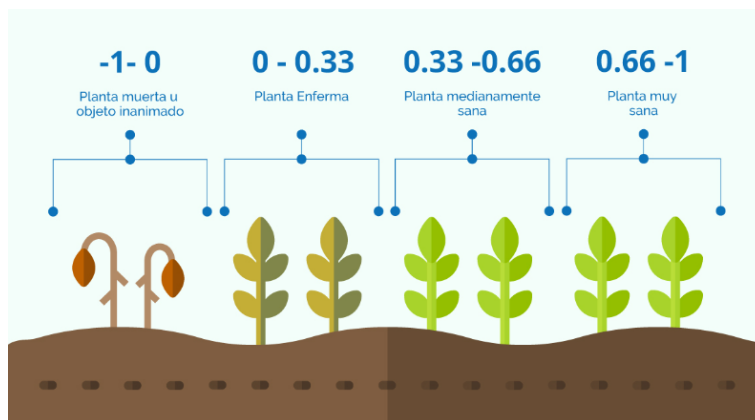
Según el inventario general de bosques de El Salvador (MARN, 2018), el país abarca aproximadamente el 37,9 % de su territorio (799,209.32 hectáreas) con cobertura boscosa, incluyendo todas las clasificaciones de bosques que representan la fuente primaria y esencial de oxígeno en el país.

El Área Natural Protegida Complejo San Marcelino, con una extensión de 1 612 hectáreas, representa aproximadamente el 0,202 % del total de la superficie boscosa del país. Aunque pueda parecer una zona pequeña, su importancia es notable cuando se compara con municipios como Sonsonate (el más extenso del departamento con 23 250 hectáreas), donde el área protegida representa el 6,93 % de su superficie y, en el caso de Izalco (segundo municipio más grande con 17 590 hectáreas), representa el 9,16 % de su extensión. En comparación con todo el departamento de Sonsonate (122 600 hectáreas), el Complejo San Marcelino abarca el 1,31 % del territorio departamental, aportando oxígeno principalmente en la zona este. Es importante resaltar que Sonsonate es el departamento con menor área boscosa en el país, con aproximadamente el 2,45 % de la superficie total nacional (García-Nieto et al., 2019).

Los índices de vegetación se refieren a operaciones algebraicas realizadas sobre los valores numéricos de los píxeles de las imágenes obtenidas del Sentinel-2, utilizando dos o más bandas de la misma escena. Estos índices son definidos como parámetros calculados a partir de los valores de reflectancia en diferentes longitudes de onda, siendo particularmente sensibles a la cobertura vegetal (Gilabert et al., 1997).

Figura 1

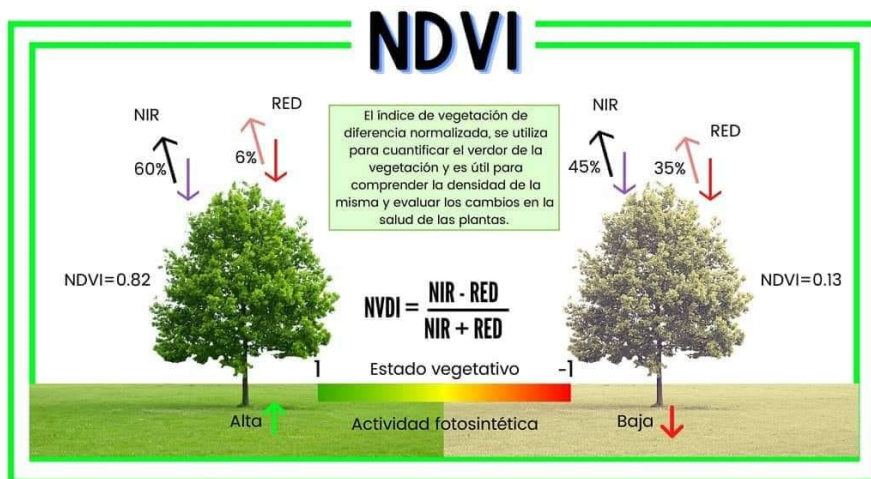
Valores de referencia del índice NDVI



Nota. Auravant (2024).

Figura 2

Referencia NDVI según actividad fotosintética



Nota. Tutorias SIG (2021).

Los valores bajos de los índices de vegetación suelen indicar una vegetación poco vigorosa, mientras que los valores altos indican una vegetación más saludable. Es importante contextualizar el índice utilizado en un entorno particular mediante mediciones en el terreno. En ausencia de mediciones, las imágenes de índices solo proporcionan indicadores relativos de la cantidad de vegetación presente. En este estudio, se hizo visitas técnicas para verificar algunos elementos, incidentes y, la vegetación real.

Para ello se utilizó Sentinel-2, dado que proporciona imágenes ópticas de alta resolución para servicios terrestres; por ejemplo, imágenes de vegetación, suelo y cobertura de agua, vías navegables interiores y zonas costeras. Igualmente, información para servicios de emergencia. Los satélites gemelos Sentinel-2A y Sentinel-2B fueron lanzados respectivamente el 22 de junio de 2015 y el 7 de marzo de 2017.

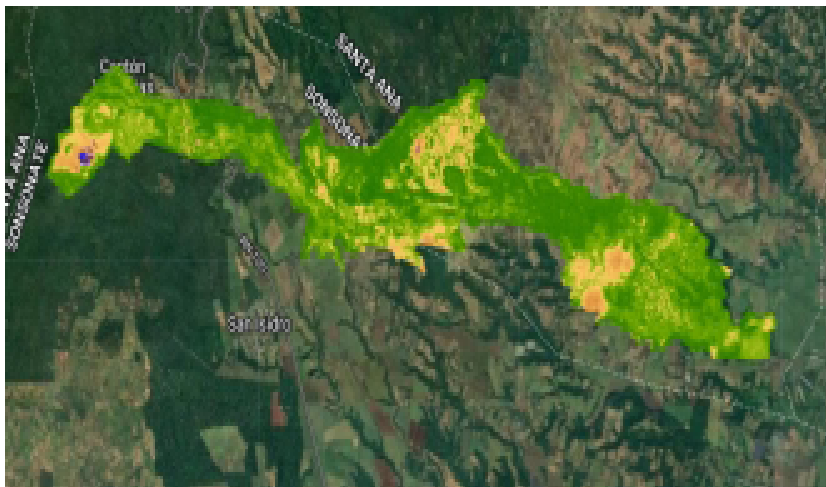
Desarrollo del tema

El objetivo del estudio radica en examinar y evaluar los cambios en la cobertura forestal dentro del área protegida, empleando el índice de vegetación NDVI, inspecciones de campo e imágenes satelitales; esto se realiza con la intención de investigar y presentar los datos de modo que permita la acción basada en análisis estadísticos detallados y observaciones específicas del terreno.

El perímetro del área de estudio se definió con coordenadas satelitales y se refinó mediante visitas técnicas en el terreno. Posteriormente, se procesó utilizando Google Engine, donde se aplicó filtros de perímetro y de corte para restringir la visualización y el análisis exclusivamente a la zona de estudio. Para esta tarea, se extrajo imágenes del Sentinel-2 y se utilizó una porción geométrica con 275 puntos, distribuidos de manera que cubran integralmente el área de estudio, conformando así un polígono delimitado por dichos puntos (coordenadas).

Figura 3

Zona perimetral estudiada San Marcelino



Para derivar los índices de vegetación de la información satelital, que consiste en imágenes con múltiples bandas, es necesario categorizar y agrupar la información para poder distinguir áreas con características particulares. Una forma de realizar esta categorización o agrupamiento es mediante la elaboración de índices. En este estudio se empleó imágenes del Sentinel-2 para crear índices de vegetación. El índice seleccionado fue el NDVI, el cual utiliza el cociente de la reflectancia entre dos bandas, generalmente el rojo y el infrarrojo cercano, debido al marcado contraste o diferencia en la reflectancia que presenta la clorofila en ambas bandas (Muñoz-Aguayo, 2013).

Una vez finalizada la recolección de datos, estos fueron procesados y posteriormente analizados. La información obtenida se procesó utilizando software de hojas de cálculo estadístico, lo cual resulta de gran utilidad para manejar grandes volúmenes de datos. Además, se utilizó herramientas como Google Maps, Google Earth, Google Engine, ArcGIS y Python para el análisis de los datos satelitales. Por último, la visualización e interpretación de los resultados obtenidos en el estudio se facilitó mediante la generación de gráficos y la visualización de figuras que representan los índices de vegetación.

Resultados

Comportamiento de la vegetación y eventos ambientales

En esta sección se muestra el comportamiento del índice de vegetación NDVI. Se presenta una serie temporal del NDVI con intervalos de un mes, lo que permite tener una visión completa del comportamiento de la vegetación a lo largo del tiempo. Se ha establecido un índice máximo de nubosidad del 10 % para garantizar la eficacia de las imágenes analizadas.

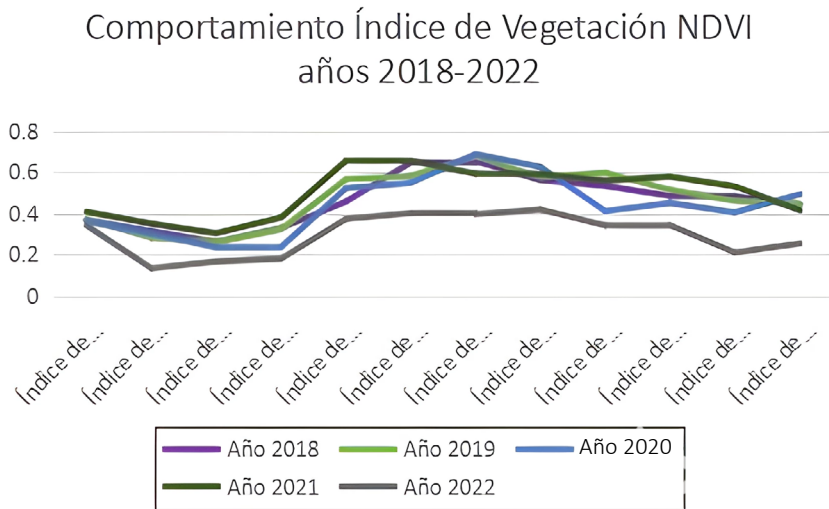
Tabla 1

Índices de vegetación zona protegida San Marcelino

Índice de vegetación medio enero	0.36754012	0.3736039	0.36123684	0.40828812	0.34128207
Índice de vegetación medio febrero	0.3135858	0.28085545	0.3025192	0.35008648	0.13362291
Índice de vegetación medio marzo	0.2617854	0.26003674	0.2348387	0.30399573	0.16702335
Índice de vegetación medio abril	0.32921255	0.3229396	0.23770858	0.38062862	0.18026246
Índice de vegetación medio mayo	0.4577326	0.5662961	0.52256614	0.65632373	0.37340885
Índice de vegetación medio junio	0.6476722	0.5806869	0.5484982	0.65632373	0.40192273
Índice de vegetación medio julio	0.6545487	0.67860335	0.6881966	0.5929841	0.39597636
Índice de vegetación medio agosto	0.5615997	0.57443196	0.62605566	0.5929841	0.419434
Índice de vegetación medio septiembre	0.53409076	0.5982235	0.41193524	0.5585382	0.34165585
Índice de vegetación medio octubre	0.48498872	0.5144153	0.45062077	0.5793004	0.34317952
Índice de vegetación medio noviembre	0.48360825	0.4612866	0.4058213	0.5313658	0.21031688
Índice de vegetación medio diciembre	0.44187456	0.44742876	0.49305892	0.41554072	0.2539986

Figura 4

Comportamiento índice de vegetación



Según Gonzaga-Aguilar (2016), la obtención de datos presenta desafíos debido a la distribución irregular de las estaciones y a la falta de información en algunos registros. En el caso de la zona protegida de San Marcelino, se ha priorizado la minimización de la influencia de la densidad de estaciones, manteniendo un porcentaje de nubosidad por debajo del 10 %. Sin embargo, esta estrategia ha resultado en un aumento de los vacíos en la información registrada, lo que ha llevado a una mejora en la calidad de las imágenes, pero, a una reducción en su cantidad. Aunque este efecto era necesario, es preferible tener menos imágenes de mejor calidad que, un mayor volumen de imágenes de menor calidad.

El Índice Normalizado de Vegetación (NDVI, por sus siglas en inglés) ha emergido como una herramienta crucial en estudios ambientales y ecológicos; su relevancia radica en la capacidad de proporcionar una representación cuantitativa de la vitalidad y salud de la vegetación en un área determinada (Pettorelli et al., 2005, como se cita en Gonzaga-Aguilar, 2016). La variación en los valores de NDVI presentados en una serie temporal, ofrecen una visión detallada de las dinámicas de la vegetación con relación a eventos específicos o condiciones ambientales.

El valor del NDVI varía entre -1 y +1; valores altos cercanos a 1 revelan alta actividad fotosintética de la cubierta vegetal (fenología foliar) y una estrecha relación con la evapotranspiración (Tucker y Sellers, 1986, como se cita en Arboit y Maglione, 2018); los valores bajos cercanos a -1 indican situaciones de escasa o nula cubierta vegetal y baja actividad fotosintética. En la Tabla 1, los valores del NDVI de la zona nunca están por encima de 0.8, pero, en la mayor parte del año se mantienen por debajo de 0.5, lo cual es preocupante debido a la importancia de esta zona en cuanto a flora, fauna y retención de agua.

El rango común para la vegetación se ubica entre 0.2 a 0.8 (por encima del cual se tiende a saturar en bosques). Este índice, al representar la actividad fotosintética, está asociado con la biomasa, la productividad primaria neta, el secuestro de carbono, el estrés hídrico de la vegetación y la biodiversidad de los ecosistemas (Nagendra et al. 2013 y Pereira et al. 2013, como se cita en Cruz-Flores et al (2020). Por lo que, según los índices de vegetación presentados en la zona protegida San Marcelino (Tabla 1) está lejos de saturar en bosque, debido a que no sobrepasa nunca ni en sus mejores momentos el 0.8 sugerido por Cruz-Flores et al. (2020); por ejemplo, en julio apenas sobrepasa el valor de 0.65, cuando los cultivos de la zona se encuentran en su mejor momento en cuanto a follaje; y, mucha de la maleza y árboles que, con la entrada del invierno se vieron afectados positivamente, ven sus puntos de vigorosidad más altos.

Según Piscoya (2019), entender la cobertura vegetal es crucial para lograr una gestión sostenible de los recursos, conservar la biodiversidad y, mitigar los impactos ambientales y el cambio climático. Es esencial resaltar el comportamiento observado en septiembre, donde algunas áreas limítrofes de la zona protegida muestran una ligera disminución debido al proceso de dobla de maíz y siembra de frijol. Aunque el descenso no es tan pronunciado, es relevante destacar que muchos agricultores, con el fin de evitar sombras en sus cultivos o, para tener más espacio para sembrar, talan parte de la vegetación que separa las áreas cultivadas de la zona protegida. Este comportamiento se refleja en la disminución del índice de vegetación en las zonas limítrofes, especialmente en la franja divisoria de San Marcelino.

El análisis de los datos revela que ciertos meses experimentan variaciones en el índice de vegetación debido a eventos específicos o factores estacionales; por ejemplo, se observa fluctuaciones significativas en el mes de febrero durante los años analizados. Mientras que el índice de vegetación para febrero de 2021 fue ligeramente más alto en comparación con otros años, febrero de 2022 mostró una marcada disminución. Estas caídas en el NDVI sugieren alteraciones en la salud de la vegetación, posiblemente causadas por condiciones ambientales adversas, eventos climáticos extremos o, actividades humanas (Arboit y Maglione, 2018).

Por otro lado, abril suele presenciar las primeras tormentas esporádicas en la región, lo que puede resultar en un aumento en la salud de la vegetación, reflejado en un incremento del NDVI. Sin embargo, esta tendencia no se repite todos los años. En particular, abril de 2022 se destacó por la aparición de una zona en color azul, indicativo de la completa ausencia de vegetación. Esta devastación fue causada por un incendio forestal que arrasó el cerro San Marcelino. Los incendios forestales son eventos catastróficos que pueden tener un impacto drástico en el paisaje y afectar la salud del ecosistema a largo plazo.

Los ecosistemas afectados por incendios pueden tardar años, incluso décadas, en recuperarse a su estado original y, la recuperación puede depender de una serie de factores, incluida la gravedad del incendio, las condiciones ambientales posteriores y, las intervenciones de manejo (Cruz-Flores et al., 2020).

Los incendios forestales son uno de los más grandes peligros que corren los bosques. La falta de políticas públicas e inversión para su detección y aplacamiento es una carencia de las gestiones actuales (Piscocoy, 2019). En este sentido, el análisis de cobertura forestal mediante el índice NDVI contribuye para conocer incidentes como incendios o tala indiscriminada; es decir, que puede servir de insumo para el análisis y planeación de políticas públicas para controlar y mitigar este tipo de incidentes.

En octubre, las tormentas son poco frecuentes, lo que hace que la vegetación, como la maleza y los árboles no aclimatados o débiles, comience a sucumbir ante las inclemencias del clima. Esta situación, combinada con la escasez de vegetación y la presencia abundante de rocas, que aumentan el calor, tiene un impacto significativo en la flora, como se refleja en el análisis del NDVI desde una perspectiva fotosintética, mostrando una disminución. Desde septiembre, se percibe una disminución en la densidad de la vegetación, que se hace más evidente en noviembre, diciembre y, especialmente, en los meses más secos: enero, febrero, marzo y, parte de abril.

Conclusiones

En resumen, la vigilancia y el análisis del NDVI son cruciales para comprender y anticipar las respuestas de los ecosistemas ante eventos específicos y cambios ambientales. Las herramientas y técnicas para este monitoreo son esenciales para la conservación y gestión efectiva de los recursos naturales.

Se observa un patrón estacional en los datos del NDVI, con picos en ciertos meses seguidos de descensos, lo que es característico de áreas donde la vegetación responde a patrones climáticos, como la estacionalidad de las lluvias.

El año 2021 destaca con el índice NDVI más alto entre los años presentados, especialmente entre marzo y julio, indicando condiciones favorables para la vegetación, posiblemente debido a una temporada de lluvias intensa o una menor actividad humana, influenciada a nivel mundial por la limitación de la pandemia del COVID-19.

Por otro lado, se observa una tendencia decreciente en el NDVI en 2022, en comparación con años anteriores, debido a diversos factores como condiciones climáticas menos favorables, aumento de la actividad humana e, incluso, eventos naturales como los incendios.

La comparación entre 2018 y 2022 revela diferencias significativas en el comportamiento a lo largo del año, resaltando la variabilidad interanual y la influencia de factores externos en la vegetación de un año a otro.

Como recomendación, se sugiere obtener una mayor cantidad de imágenes para el análisis de teledetección y trabajar con índices de nubosidad bajos para mejorar la calidad del análisis. Además, delimitar la zona protegida con una mayor cantidad de puntos, similar a un fractal, ayudará a mejorar la exactitud de los resultados.

Será necesario realizar campañas de concientización sobre el cuidado y conservación del medio ambiente en la zona protegida. También se puede implementar torres de vigilancia equipadas con cámaras y sensores para monitorear, analizar y predecir el cambio climático y forestal. Finalmente, en investigaciones futuras, se podría considerar la implementación de otros índices de vegetación para obtener un análisis más completo desde diferentes enfoques.

Referencias

- Arboit, M. E. y Maglione, D. S. (2018). Análisis multitemporal y multiespacial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) en centros urbanos forestados y oasis irrigados, con climas secos. *Boletín de Estudios Geográficos*, 109(6), 13-60.
- Auravant. (2024). Índices de vegetación y su interpretación: NDVI, GNDVI, MSAVI2, NDRE y NDWI [imagen]. <https://www.auravant.com/blog/agricultura-de-precision/indices-de-vegetacion-y-como-interpretarlos>
- Cruz-Flores, D. D., Curbelo-Benitez, E. A., Ferrer-Sánchez, Y. y Ávila, D. D. (2020). Variaciones espaciales y temporales en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada en Cuba. *Ecosistemas*, 29(1), 1-12. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1885>
- García-Nieto, M., Martínez-Trinidad, T., Arjona-Suarez, E., Santos-Posadas, H., Lugo-Espinosa, O. y Jiménez-Casas, M. (2019). Aplicación móvil para la captura de datos de inventario en plantaciones de eucalipto. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 6(16), 183-190. <https://doi.org/10.19136/era.a6n16.1844>.
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J. y García-Haro, F. J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de la Asociación Española de Teledetección*, (8).
- Gonzaga-Aguilar, C. (2016). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *CEDAMAZ*, 5(1), 30-41.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). (2018). Memoria de Cálculo. Inventario Nacional de Bosque de El Salvador 2017-2018. <https://bibliotecaambiental.ambiente.gob.sv/documentos/memoria-de-calculo-inventario-nacional-de-bosque-de-el-salvador-2017-2018/>
- Muñoz-Aguayo, P. (2013). *Apuntes de teledetección. Índices de vegetación*. CIREN Centro de Información de Recursos Naturales.
- Piscoya, L. R. (2019). Índice de vegetación de diferencia normalizada (*Ndvi*) en el distrito de Puquina, Moquegua [Trabajo de Suficiencia, Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur]. <http://repositorio.untels.edu.pe/jspui/handle/123456789/144>
- Tutorías SIG. (2021, 10 de febrero). *El índice de vegetación de diferencia normalizada* [Imagen]. Facebook. <https://www.facebook.com/photo.php?fbid=179712883910002&id=105373034677321&set=a.120758469805444>

Capítulo 5.

Sistema automático y portable de monitoreo de material particulado utilizando IoT para determinar la calidad del aire en la ciudad de San Juan de Pasto

Leibnitz Eduardo Chana Calderón

Jorge Andrés Chamorro Enríquez

Juan Carlos Narváez Burgos

Cítese como: Chana-Calderón, L. E., Chamorro-Enríquez, J. A. y Narváez-Burgos, J. C. (2024). Sistema automático y portable de monitoreo de material particulado utilizando IoT para determinar la calidad del aire en la ciudad de San Juan de Pasto. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 61-84). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c423>

Resumen

Este estudio presenta un prototipo automático y portátil basado en Internet de las Cosas (IoT) para monitorear la concentración de partículas finas (PM10) en San Juan de Pasto, evaluando la calidad del aire. El desarrollo se divide en cuatro fases: selección del sensor Sensirion SPS30, integración con servicios en la nube para estructurar y asegurar la seguridad de los datos, toma de datos en sitio y presentación de resultados en una plataforma web. Los datos, representados en un mapa interactivo, permiten evaluar la calidad del aire, clasificados por colores. Este enfoque proporciona información accesible desde cualquier dispositivo con conexión a Internet, ofreciendo detalles sobre la calidad del aire local.

Palabras clave: contaminación atmosférica; estación de calidad de aire; Internet of Things; Raspberry Pi; monitoreo ambiental

Introducción

La creciente preocupación por el deterioro de la calidad del aire (AQI, por sus siglas en inglés) ha captado la atención tanto de las autoridades ambientales como del ámbito de la salud pública. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005), la contaminación atmosférica es responsable de un preocupante 34 % de las muertes en adultos, debido a enfermedades cardíacas, del 43 % de las enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y, del 29 % de los casos de cáncer de pulmón. La magnitud de este problema se manifiesta a escala global, afectando al 90 % de la población mundial, que respira un aire contaminado.

En este contexto, la AQI se posiciona como un factor intrínsecamente ligado a la mortalidad, el aumento de admisiones hospitalarias y la aparición de enfermedades circulatorias y cardíacas, impactando directamente en la calidad de vida. Este fenómeno se atribuye principalmente a la inhalación de partículas finas, con diámetros aerodinámicos inferiores a $10\ \mu\text{m}$ y $2,5\ \mu\text{m}$, según estudios como el de Tyler et al. (2013). El MP10 generado por el humo oscuro de los tubos de escape de los automóviles y el polvo de las calles, se compone tanto de partículas primarias como secundarias. Las partículas primarias consisten en partículas sólidas y líquidas, mientras que las secundarias se forman por reacciones químicas a partir de materiales gaseosos como el dióxido de azufre (SO_2), compuestos orgánicos volátiles (COV) y amoníaco (NH_3), formando partículas de sulfato y nitrato suspendidas en el aire debido a la oxidación química de compuestos orgánicos (Sans y Ribas, 1989).

La problemática no es ajena al municipio de San Juan de Pasto, Nariño. Actividades humanas como la industria de la construcción, incendios forestales, quemas, combustión de motores y el crecimiento del tráfico vehicular han convertido a este lugar en un significativo contribuyente a la contaminación atmosférica. Según Onursal y Gautam (1997), el tráfico vehicular es la principal fuente de emisiones contaminantes en la atmósfera, liberando partículas de carbono negro en forma de humo u hollín a través de los tubos de escape.

Por ende, resulta esencial medir las concentraciones de contaminantes atmosféricos inferiores a 10 micrómetros, especialmente peligrosas para la salud respiratoria en grupos vulnerables como niños menores de 5 años y adultos mayores de 65 años, debido al aumento de material particulado (MP), (Área Metropolitana Valle de Aburrá, 2019). En respuesta, se propone el desarrollo de un prototipo con sensores de NDIR para recopilar información y contribuir a la Red de Vigilancia de Calidad del Aire, SISAIRE. Esta iniciativa surge ante la discontinuidad de las estaciones de monitoreo de MP10 y MP2.5, afectadas por costos de mantenimiento elevados y la necesidad de personal calificado para análisis en laboratorios.

Adicionalmente, los informes de la Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO, 2017) indican que las pruebas para MP, correspondiente a PM10 y

MP2,5 fracción respirable en Colombia, establecen límites permisibles de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $37,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, en un período de exposición no mayor a 24 horas. Los datos recopilados durante el 'Día sin carro y moto', en septiembre de 2017 señalan incidencias de MP10 con una concentración de $42,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, considerando el número de vehículos en circulación en ese momento. Estos resultados subrayan la urgencia de abordar la AQI en San Juan de Pasto.

Desarrollo del tema

Antecedentes

Basado en los trabajos previos realizados en el campo del IoT, se ha demostrado un enfoque hacia la problemática de la contaminación del aire, tanto en espacios interiores como exteriores. Estos estudios han utilizado tecnologías de bajo costo y de fácil acceso para permitir a los usuarios obtener información y conocimientos sobre la AQI. En las ciudades, es crucial identificar áreas contaminadas por gases nocivos y determinar sus fuentes de origen. Para abordar esto, se ha implementado dispositivos conectados a la nube, que envían alertas a través de correo electrónico o redes sociales sobre el estado de la AQI.

Los modelos metodológicos desarrollados están compuestos de cuatro fases; en la primera se recopila los datos de los sensores como entradas al sistema de control, garantizando su confiabilidad. Estos datos se cargan en la nube para su procesamiento y visualización en una plataforma IoT. En la segunda fase se define los requisitos de software, utilizando Python como lenguaje de programación para la codificación e integración de los módulos. La tercera fase implica la implementación del marcado de hipertexto (HTML) y el preprocesador de hipertexto (PHP) para el desarrollo web, junto con la plataforma ThingSpeak IoT, encargada del almacenamiento en la nube. La fase final del proyecto se enfoca en asegurar la funcionalidad, accesibilidad y usabilidad del prototipo.

Esto se logró programando la API, estableciendo conexiones seguras vía HTTP, implementando sistemas de almacenamiento y recuperación de datos y, asignando una IP de dominio público. También se incluye la generación de notificaciones y alertas a través de un servidor, como el correo de Google (Zakaria et al., 2018).

En un estudio adicional (Dhingra et al., 2019) sobre la contaminación de MP en exteriores, se destaca la importancia de implementar un sistema de monitoreo portátil en la ciudad, bajo el cumplimiento de la norma ISO 14001 como estándar medioambiental. El objetivo es medir el Índice de Calidad del Aire y proporcionar pronósticos diarios en tiempo real durante periodos de 24 horas para identificar áreas contaminadas. Se utiliza sensores de bajo costo y portátiles, integrados en la tarjeta de Arduino Uno y el módulo Wi-Fi ESP8266. Los datos recopilados son visualizados en la plataforma Ubidots IoT, accesible desde un sitio web o dispositivo móvil. La aplicación desarrollada en Java, Eclipse y el SDK de Android permite a

los usuarios tomar decisiones informadas sobre rutas de viaje y prever el nivel de contaminación antes de salir de casa. Aunque el sistema presenta desafíos en la gestión de grandes volúmenes de datos generados por los sensores, se sugiere buscar formas de mejorar la integración de datos en la plataforma IoT para optimizar el rendimiento del sistema.

En otro artículo, se describe la implementación de un sistema de monitoreo de bajo costo en tiempo real durante aproximadamente cinco semanas en la ciudad de Malasia. El sistema se centró en analizar los contaminantes que afectan la AQI, como el material particulado (MP_{2,5}) y el monóxido de carbono (CO), además de registrar la temperatura ambiente y la humedad relativa. El sistema utilizó la plataforma ThingSpeak IoT, y se integró con el microcontrolador ATmega32U4 del Arduino Yun Mini con el sensor de polvo Sharp GP2Y1010AUF0F, así como con el módulo de comunicaciones móviles (GSM) SIM900 para enviar mensajes al dispositivo móvil y visualizar la información en una pantalla LCD 16x2. Para medir la temperatura y la humedad relativa se utilizó el sensor DHT22 reconocido por su fiabilidad y estabilidad, ya que cuenta con una señal digital calibrada de fábrica. En cuanto a la comunicación de red, se empleó el módulo Wi-Fi ESP8266, que permitió la conexión de doce tipos de sensores de gas y cinco sensores ambientales. También se desarrolló un sistema adicional para medir el CO₂ en entornos industriales, utilizando el microcontrolador ATMEGA8535 y el sensor de calidad de aire TGS2600.

Otro analizador (Hawari et al., 2019) se construyó con el microcontrolador PIC18F4550 y el sensor de CO MQ-7, que incluye una unidad de alimentación, una unidad de acondicionamiento de señal, un ventilador de CC sin escobillas para regular el flujo de aire, componentes electrónicos para alarmas, una pantalla LCD y microcontroladores UNIT. Sin embargo, la implementación inalámbrica del sistema se realizó utilizando un módulo Bluetooth HC-05, el cual tenía un alcance limitado, lo que resultó en una menor detección de concentraciones en la ciudad. Se destaca la importancia de calibrar adecuadamente los sensores de CO MQ-7 para garantizar su confiabilidad, ya que no vienen calibrados de fábrica. En conclusión, el estudio logró monitorear con éxito el material particulado PM_{2,5} durante cinco semanas, observando cambios significativos en la sensibilidad en comparación con el material particulado PM₁₀.

El artículo destaca la importancia de utilizar internet para medir la AQI de manera remota y obtener datos en tiempo real. También advierte sobre los posibles riesgos de seguridad y privacidad que pueden comprometer la integridad de los datos; menciona la posibilidad de ataques de j áquers que podrían manipular los sensores y enviar información falsa, lo que conduciría a resultados incorrectos y engañosos. Para abordar este problema, se propone implementar un sistema seguro mediante la encriptación y autenticación de usuarios y contraseñas, buscando garantizar la seguridad y eficiencia energética del sistema.

Además, se indica el desafío de manejar grandes cantidades de datos generados por cada nodo y sensor, lo que se conoce como Big Data. El sistema debe ser capaz de gestionar y procesar esta gran cantidad de datos eficientemente.

El desarrollo metodológico del sistema se divide en tres fases: la primera se enfoca en la implementación de nodos con diversos sensores y la transmisión cifrada de los datos a través de internet, asegurando la conectividad del sistema. La segunda se centra en el almacenamiento y procesamiento de los datos en la nube, así como en la generación de alertas según reglas de seguridad definidas previamente; en esta etapa se aplican medidas de autenticación, cifrado y autorización para proteger los datos. La fase final involucra el desarrollo de una aplicación móvil con una interfaz gráfica que permite a los usuarios autenticarse y acceder a los datos almacenados en la web. El objetivo principal del estudio es desarrollar un sistema de Internet de las Cosas (IoT) basado en una arquitectura segura, que abarque desde la autenticación de los sensores hasta el envío y cifrado de los datos del servidor hacia la nube (Malche et al., 2019).

Marques et al. (2019) proponen evaluar la AQI en espacios interiores mediante el uso de IoT para calcular el AQI. Se enfoca en abordar el problema de la AQI en entornos interiores donde las personas pasan la mayor parte de su tiempo. El estudio busca generar informes útiles para la toma de decisiones en políticas de salud pública y facilitar el diagnóstico de problemas de salud en los pacientes. Utiliza el módulo ESP8266 y el sensor de dióxido de carbono (CO₂) MHZ-19 para la recolección de datos, con almacenamiento en una base de datos SQL SERVER y medidas de seguridad mediante autenticación de usuario. La comunicación de datos se realiza a través de servicios como ASP.NET y se utiliza una aplicación móvil diseñada en SWIFT. El costo del prototipo desarrollado es significativamente menor que los modelos comerciales disponibles en el mercado. Además, el sistema cuenta con la capacidad de cambiar al modo de punto de acceso en caso de falta de conexión a internet.

A continuación, se presentan los artículos más citados durante los últimos cinco años.

El estudio de Zheng et al., (2016) analiza en profundidad la AQI en zonas urbanas mediante el uso de sistemas IoT. Los resultados demuestran la confiabilidad de los datos recopilados. Los sistemas de IoT utilizados consisten en redes de sensores inalámbricos (WSN). Para medir la concentración de PM_{2,5}, se optó por el sensor PMS5005, distribuido estratégicamente por la ciudad. Estos sistemas se basan en la tecnología M2M, que permite una comunicación de baja potencia a través de una red LPWA, con un consumo de corriente muy bajo y baterías de litio ligeras y portátiles que pueden durar hasta diez años, complementadas con paneles solares. Los nodos WSN fueron colocados alrededor de los edificios, a una distancia de hasta 3 km, permitiendo una comunicación en tiempo real hasta un punto de acceso central con una antena instalada en el techo de un edificio en el campus universitario. Los sensores láser NDIR fueron la herramienta principal utilizada, ya

que convierten la dispersión de luz causada por las partículas en señales eléctricas amplificadas y procesadas para determinar su tamaño y cantidad. La Unidad del Microprocesador (MCU) utilizada fue la STM32F103RC, una tarjeta de desarrollo de alto rendimiento basada en el microcontrolador ARM-CORTEX, ampliamente utilizada en sistemas de control industrial y de comunicaciones; consume poca energía y cuenta con características de STANDBY que permiten al sensor recopilar datos cada diez minutos, considerando que la AQI varía poco con el tiempo. Los datos recopilados son enviados a un servidor donde se hace un filtrado para revelar la tendencia de la AQI en la ubicación geográfica. El almacenamiento de datos en el servidor utiliza la tecnología WebSocket para una actualización eficiente en tiempo real a través del protocolo HTTP Server. La comunicación entre el servidor y la aplicación web se logra mediante una API y una página HTML en JavaScript y CSS, y también se desarrolla una aplicación móvil para dispositivos Android.

La IQA se observó durante un periodo de dos semanas, agrupando los datos de seis contaminantes para calcular el Índice de Calidad del Aire individual (IAQI). Aunque la distancia entre los nodos y la potencia de transmisión pueden afectar los datos y valores de correlación, se verificó la confiabilidad de los datos comparándolos con una base de datos histórica reconocida y de dominio público. A pesar de ciertas discrepancias, se encontró una tendencia y correlación coincidentes. Las características meteorológicas, como la temperatura, humedad y velocidad del viento también pueden influir en los resultados. Se observó un aumento gradual en la concentración de PM_{2,5} en el séptimo día, debido a la velocidad del viento por debajo de los cuatro metros por segundo. En efecto, el estudio demuestra la viabilidad y confiabilidad de los sistemas de IoT para medir la AQI en zonas urbanas.

En el estudio de Karar et al., (2020), se desarrolló un sistema llamado 'GASDUINO' en la Universidad de Shaqra para abordar el problema de la AQI en ciudades industriales como Arabia Saudita. Utilizaron la placa de Arduino Uno y el entorno de programación Arduino IDE, junto con el sensor de gas MQ-135 para detectar gases como NH₃, NO, alcohol, benceno, humo y CO₂ con el fin de determinar la AQI. El sistema mostró una respuesta rápida, obteniendo valores de 40 a 70 partes por millón (PPM) durante la noche y observando un aumento durante el día de 30 a 40 PPM. El sistema se compone de un módulo Wi-Fi ESP8266 que recibe la información de los sensores y la transmite a través de una aplicación móvil basada en Android llamada RemoteXY Cloud Server. Esta información puede ser consultada fácilmente desde cualquier dispositivo conectado a internet. La interfaz de usuario (UI) muestra al usuario la AQI en unidades de PPM que se convierten en porcentajes. Este indicador clasifica la AQI como buena (0-50), moderada (51-150) e insalubre (151-200), representada por los colores verde, azul y rojo, respectivamente.

La red de sensores inalámbricos de gas monitorea la AQI durante un periodo de 24 horas con el objetivo de predecir los niveles de AQI utilizando modelos de inteligencia artificial como redes neuronales y lógica difusa. Con esto, se busca

obtener una mejor comprensión de la AQI y tomar medidas preventivas adecuadas. De este modo, el sistema GASDUINO proporciona una solución eficiente para monitorear la AQI en ciudades industriales; su implementación utiliza sensores de gas, una plataforma IoT y una aplicación móvil para brindar información en tiempo real sobre la AQI, permitiendo tomar medidas oportunas para mejorarla.

Taştan y Gökozan (2019) desarrollaron un sistema llamado E-Nose para medir la AQI, que utiliza una combinación de sensores ópticos biométricos, incluyendo un sensor de densidad de polvo GP2Y1010AU, un sensor infrarrojo NDIR para CO_2 , un sensor de gas dual para CO y dióxido de nitrógeno (NO_2) y, un sensor de temperatura DHT22. El sensor de densidad de polvo GP2Y1010AU utiliza un diodo emisor de luz roja y un fototransistor para detectar la presencia de polvo en el aire. Proporciona una salida analógica proporcional a la densidad de polvo con una sensibilidad de 0.5 V/0.1 mg/m³. El sensor NDIR MH-Z 14 mide niveles de CO_2 en un rango de 0 a 5000 PPM. El sensor de gas dual MiCS-4514 se especializa en la detección de humo de tubos de escape de automóviles, pero también puede medir NO_2 , CO e hidrocarburos en la atmósfera. El sensor DHT22 se utiliza para medir la temperatura ambiente. El estudio se realizó para medir concentración de MP en el aire y su efecto en un grupo de 63 personas entre 18 y 65 años. Se observó un aumento en el número de latidos del corazón de 4 a 6 latidos por minuto (lpm) y un incremento en la presión arterial sistólica (PAS). El sistema E-Nose desarrollado tiene un costo aproximado de \$100 dólares y utiliza un módulo Wi-Fi ESP32 de 32 bits de doble núcleo. La plataforma IoT utilizada es Blink IoT, que permite recibir datos y graficar los niveles de gases contaminantes, temperatura y humedad. El sistema envía notificaciones cada cinco minutos; utiliza la tarjeta de desarrollo WEMOS D1 y el sensor de polvo PMS50003 de alta interferencia; tiene un consumo de corriente relativamente bajo de 160 miliamperios (mA) y puede ser alimentado a través de una conexión USB a 12 V CC o mediante una PowerBank de 5000 miliamperios hora (mAh). Esto permite realizar doce mediciones en intervalos de cinco minutos, con una duración total de aproximadamente 30 horas de toma de muestras. En términos generales, el sistema es asequible y eficiente para medir la AQI. Utiliza una variedad de sensores para detectar gases contaminantes y partículas en suspensión en el aire, e integra una plataforma IoT para visualizar y analizar los datos. Los resultados destacan los efectos negativos de la contaminación del aire en la salud cardiovascular de las personas.

Pu'ad et al. (2019) desarrollaron un sistema portátil para el monitoreo remoto de la AQI con el objetivo de evaluar el rendimiento de un prototipo a través de ocho pruebas, utilizando seis sensores validados experimentalmente. Para la detección de partículas PM₁₀, se utilizó el sensor PPD42NS, mientras que para las partículas PM_{2,5} se empleó el sensor GP2Y1010AU0F y el sensor MQ-131 para analizar dióxido de azufre, NO_2 y ozono a nivel del suelo. Además, se incorporó el sensor DHT22 para medir la humedad y temperatura del ambiente. El sistema cuenta con conectividad a internet y utiliza la geo-posición (GPS) para etiquetar

la ubicación con datos de altitud y latitud, utilizando Google Maps. Estos datos son actualizados constantemente, sin necesidad de estar conectado a internet. Se utiliza un servidor web que requiere mantenimiento y emplea tecnología Python mediante el framework Flask para crear una aplicación API HTTP alojada en una dirección IP. Además, se utiliza una Raspberry Pi que permite acceder al sistema desde cualquier lugar y a través de cualquier servidor web en internet. Para mejorar la interpretación de los datos por parte del usuario, el sistema clasifica la AQI mediante colores. Sin embargo, se reconoce que la asignación de una dirección IP local con una IP global cambiante cada vez que se enciende la banda ancha puede representar un problema para los usuarios no expertos ya que, recordar la dirección IP puede ser difícil. Por lo tanto, se sugiere el uso de un dominio público para facilitar su recuerdo. En cuanto a la parte de IoT, se utilizó la herramienta Google Firebase para crear una aplicación web y móvil compatible con Android y iOS. Los datos fueron almacenados en la nube, lo que garantiza la confiabilidad en su gestión y una gran rapidez en su acceso. Se creó varias páginas para organizar los datos, siendo la página de concentración de partículas de gas una de ellas. En este sentido, el sistema portátil desarrollado por Pu'ad et al (2019) combina diversos sensores y tecnologías para el monitoreo remoto de la AQI; proporciona datos actualizados, clasifica la AQI mediante colores y utiliza la nube para un almacenamiento confiable y un acceso rápido a los datos. Este sistema ofrece una solución efectiva para evaluar la AQI de manera precisa y accesible.

Suriano (2021) pone énfasis en el uso de sensores de bajo costo, pero confiables para la monitorización de la AQI en las ciudades; se destaca el uso del sensor de polvo PMS3003 que se utiliza en un dispositivo portátil y flexible llamado 'SentiAir', el cual tiene dimensiones de 24,5 cm x 20 cm x 9 cm y permite la conexión de varios sensores a la placa Raspberry Pi mediante una placa externa adaptadora multi sensor. Esta adaptación posibilita ampliar el campo de trabajo y añadir más sensores al dispositivo. Aunque esto hace que el equipo sea más robusto, sigue ofreciendo flexibilidad y portabilidad durante la instalación. El dispositivo se conecta al puerto USB de la placa Raspberry Pi como un módem y también cuenta con conexión Ethernet, lo que permite a los usuarios controlarlo a través de la red. Dispone de un puerto serial I2C para la comunicación serial a través de los periféricos de la Raspberry Pi. La principal característica de este dispositivo es su capacidad de adaptación a las necesidades del usuario, ya que es de código abierto (*Open Source*) y modular; esto significa que puede ser utilizado por personas interesadas en abordar el problema común de la AQI, permitiéndoles personalizarlo según sus necesidades específicas. El dispositivo utiliza una placa Raspberry Pi 3 B+, una tarjeta SD clase 10 de 4 GB para el almacenamiento y se alimenta mediante un adaptador de corriente CA/CC; además, cuenta con una placa adaptadora multi sensor de bajo consumo energético y una adaptación del botón de apagado (*ShutDown*), que mejora la configuración y encendido del dispositivo.

Metodología

Paradigma de investigación: cuantitativo, basado en la recolección y análisis de datos numéricos y cuantificables. Este enfoque permitió medir y evaluar variables relacionadas con la concentración de MP, precipitación, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura ambiental en la ciudad de Pasto.

Además, se empleó herramientas de visualización de datos para presentar los hallazgos de manera clara y comprensible, lo que facilitó la interpretación de los resultados por parte de los interesados y tomadores de decisiones.

Enfoque de investigación: se basó en un enfoque de investigación cuantitativa, donde se recopiló datos numéricos sobre las variables relevantes relacionadas con la AQI en la ciudad de Pasto. Se utilizó técnicas de muestreo aleatorio para seleccionar ubicaciones representativas en la ciudad, donde se midió niveles de concentración de MP.

Los datos recopilados fueron sometidos a análisis estadístico para identificar patrones entre las diferentes variables. Se empleó métodos estadísticos descriptivos para resumir los datos y presentar una visión general de la AQI en la ciudad.

El enfoque cuantitativo permitió obtener resultados precisos y generalizables sobre la AQI en la ciudad de Pasto, lo que contribuyó a comprender la magnitud del problema y, respaldar la formulación de estrategias para mejorar la situación ambiental.

Tipo de investigación: de naturaleza aplicada y se enmarcó en un estudio tecnológico. Se utilizó teorías y principios para abordar el problema de la AQI en la ciudad de Pasto a través de la aplicación de métodos y tecnologías específicas.

Se efectuó mediciones y análisis cuantitativos de las concentraciones de MP en diferentes lugares y momentos en la ciudad; esto permitió obtener una visión detallada y objetiva de las condiciones y características del MP en términos de tiempo y espacio.

Diagnóstico:

- a) Marco temporal: el monitoreo se llevó a cabo en intervalos de diez minutos, durante lecturas de 15 minutos, programadas entre las 2 p.m. y las 6 p.m.
- b) Ámbito espacial: la ejecución de esta investigación se llevó a cabo en la ciudad de San Juan de Pasto. Las rutas que presentaban una mayor concentración de contaminantes fueron las áreas de enfoque, donde se instaló el sistema de monitoreo automático y portátil para el análisis de partículas PM10 y PM2,5.
- c) Foco demográfico: de acuerdo con las directrices establecidas, se consideró la instalación de un Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA) por cada 150,000 habitantes en ciudades con poblaciones inferiores a 500,000 habitantes.

Por consiguiente, la ciudad de Pasto estuvo dentro de este rango, al contar con una población de 472.729 habitantes, según el censo de 2021.

Validación interna: a continuación, se presenta la estructura metodológica del proyecto de investigación, organizada en distintas fases que detallan las actividades necesarias para su ejecución:

En la fase 1 se llevó a cabo una búsqueda avanzada utilizando bases de datos en Scopus y la recopilación de informes de CORPONARIÑO (2017) presentados ante el IDEAM en temas relacionados con la AQI. Esta etapa fue crucial para obtener una comprensión profunda del problema y permitir identificar la partícula con mayor incidencia en la ciudad de Pasto. El análisis de esta información fue fundamental para enfocar el estudio de manera más precisa y establecer las bases sólidas para el desarrollo de las siguientes fases.

Mediante la revisión y análisis de datos y documentos existentes, se determinó cuál era la partícula contaminante más relevante y prevalente en la zona de estudio, lo que proporcionó una orientación fundamental para el resto de la investigación.

En la fase 2 se estableció los requisitos del prototipo, como el controlador a utilizar y el modelo de tarjeta controladora. Además, se definió los requisitos de instalación del sensor según las normas establecidas por las entidades públicas de medio ambiente en Colombia. Se construyó la estructura del sistema utilizando una impresora 3D, teniendo en cuenta el diseño del sensor y su ficha técnica de instalación. También se determinó las alertas en función de la concentración de MP y se seleccionó la ubicación para la captura de datos de incidencia de partículas, con el fin de crear un mapa interactivo de la ciudad utilizando la herramienta de Python.

En la fase 3 se llevó a cabo la recopilación de datos mediante pruebas experimentales y análisis estadístico descriptivo; para ello se dispuso de la ficha técnica del sensor comparado con la ficha técnica del dispositivo Dust Track, el cual detallaba la precisión del dispositivo a usar bajo ciertas condiciones, con el fin de obtener pruebas experimentales y comparar la precisión con el prototipo desarrollado. Durante estas pruebas, se tomó lecturas de los datos durante un período de 15 minutos, mientras se recogía datos de temperatura, presión atmosférica y humedad, utilizando un termo higrómetro.

Una vez completadas estas pruebas, se generó un informe detallado de las muestras obtenidas, aplicando técnicas estadísticas para evaluar la variabilidad de los datos. Esta fase fue crucial para validar la precisión del prototipo desarrollado, así como para garantizar la confiabilidad de los datos recopilados durante el monitoreo de AQI en la ciudad de Pasto.

En la fase 4, una vez que el dispositivo fue ensamblado, se llevó a cabo una serie de pruebas para evaluar su funcionamiento como prototipo IoT. En particular,

se hizo una evaluación del funcionamiento del sistema de envío y recepción de datos en la nube; esto permitió comprobar si el prototipo era capaz de transmitir la información recopilada de manera eficiente y segura. Una vez que los datos estuvieron almacenados en la base de datos, se procedió a publicar los resultados en un mapa de la ciudad de Pasto. Esta visualización proporcionó una representación gráfica y accesible para que las autoridades y la comunidad en general pudieran tener una comprensión clara de la AQI en diferentes áreas de la ciudad.

Esta fase fue fundamental para asegurar que el prototipo funcionara adecuadamente y, para garantizar que los datos obtenidos fueran confiables y útiles para abordar la problemática de la AQI en la ciudad. Además, la publicación de los resultados en un mapa interactivo contribuirá a aumentar la conciencia sobre el tema y facilitará la toma de decisiones informadas para mejorar la AQI y proteger la salud de la población.

La fase 5 consistió en la instalación del sistema en condiciones externas, teniendo en cuenta las normas de instalación para sistemas de monitoreo del aire en Colombia. Además, se midió las concentraciones de niveles de incidencia de contaminantes con alertas a la plataforma IoT, así como la visualización de la información a partir de la recolección de los datos en un mapa interactivo.

Como resultado de la validación interna, se realizó un análisis estadístico descriptivo del nivel promedio, máximos y mínimos de la incidencia del MP proporcionado por el prototipo. Esto permitió medir su significancia para la verificación del cumplimiento de hipótesis; en otras palabras, medir la exactitud del prototipo.

Validación externa: implicó la instalación del dispositivo en diversos lugares de la ciudad para evaluar su rendimiento. Esta evaluación se basó en la transmisión de datos a la nube, respaldada por una batería, lo que proporcionó portabilidad al dispositivo.

La evaluación en ambientes externos se efectuó mediante la instalación del prototipo en campo, siguiendo las normativas colombianas establecidas para los sistemas de monitoreo de la AQI. Gracias al respaldo de la batería, la recopilación de datos puede realizarse las 24 horas del día en lugares específicos previamente definidos para su implementación. De esta manera, se pudo evaluar el funcionamiento del dispositivo. Cabe destacar que este proceso de validación fue crucial para asegurar que el dispositivo funcionara de manera eficiente y precisa en el monitoreo de la AQI.

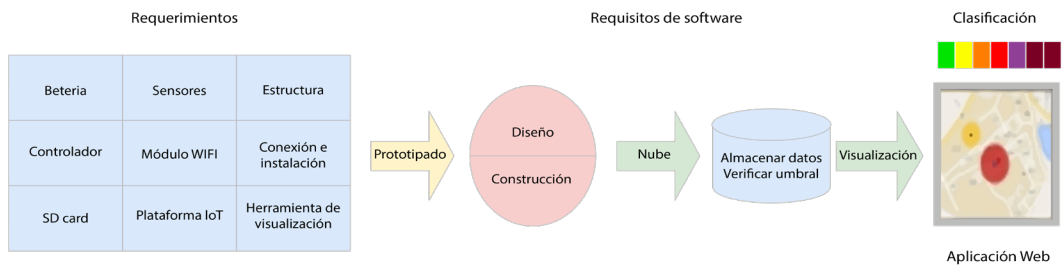
Diagrama metodológico: la Figura 1 presenta un esquema metodológico que detalla el proceso de desarrollo de la metodología del sistema. Este esquema proporciona una guía a través de diversas fases cruciales en la evolución del sistema.

Inicialmente, se identifica y define los requerimientos técnicos esenciales, tales como el sensor y el controlador. Estos elementos constituyen los componentes básicos del sistema. Posteriormente, la atención se centra en los requerimientos de software, abarcando el proceso de prototipado desde el diseño hasta la implementación del sistema.

Una vez establecidos estos requerimientos, se procede a la estructuración de los datos recabados, los cuales son almacenados en una base de datos para su análisis posterior. Finalmente, se ilustra cómo la información se presenta de manera accesible y comprensible en un mapa, permitiendo una visualización nítida de los resultados obtenidos. Este enfoque asegura que los usuarios puedan interpretar fácilmente los datos y tomar decisiones informadas basadas en los mismos.

Figura 1

Metodología integrada para el desarrollo del sistema



Nota. El diagrama metodológico representa el flujo de trabajo para el desarrollo de la metodología del sistema, desde la identificación de requisitos técnicos hasta la presentación de información en un mapa. Este diagrama estructurado facilita la comprensión y ejecución del proceso de desarrollo del sistema.

Resultados

Selección del sensor: se fundamentó en una revisión bibliográfica, en la cual destacaron los sensores NDIR de bajo costo debido a sus superiores características físicas, tal como se evidencia en las hojas de datos disponibles. Entre los atributos más notables se encuentra su alta resolución, larga vida útil y capacidad para operar ininterrumpidamente durante 24 horas, sin requerir mantenimiento preventivo ni correctivo.

Para la selección del sensor se tomó como referencia, investigaciones previas relacionadas con el monitoreo de MP. Se evaluó diversos aspectos técnicos, incluyendo la instalación del sensor y, características técnicas específicas como la resolución, el rango, el porcentaje de humedad y la tolerancia. La Tabla 1 presenta estos detalles.

Tabla 1

Comparativa de características de comunicación y estado de diversos sensores

Características de sensores NDIR			
Modelo	UART	I2C	Estado
Honeywell	Sí	—	Obsoleto
Panasonic	Sí	Sí	Vigente
Plantower	Sí	—	Vigente
Nova	Sí	—	Vigente
SPS30	Sí	Sí	Vigente

Nota. Las características de comunicación (UART, I2C) y el estado (Vigente, Obsoleto) de varios modelos de sensores fueron tomados de las fichas técnicas.

Se eligió el sensor de la marca Sensirion, modelo SPS30, debido a las ventajas que presenta en comparación con otros sensores; destacan su alta calidad y durabilidad, con una vida útil aproximada de 8 a 10 años. Además, ofrece una precisión notable en la medición de diversos diámetros de MP, con un rango de muestra que abarca desde 0 hasta 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El sensor también cuenta con una tolerancia de humedad del 80 %, lo que lo hace adecuado para diversas condiciones ambientales. Sus dimensiones compactas de 41 x 41 x 12 milímetros facilitan su montaje e instalación en diferentes ubicaciones, como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2

Especificaciones técnicas del sensor SPS30

Parámetro	Condiciones	Valor	Unidades
Precisión de la concentración de masa	0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	± 10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Rango de concentración de masa	-	0-1000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Resolución de concentración de masa	-	1	μg
Rango de tamaño de concentración de masa	PM1,0-PM10	0,3 – 10,0	μg
Vida útil	24 h/día	8	Años
Nivel de emisión acústica	0,2	25	dB(A)
Peso	-	26	g

Nota. Los parámetros incluyen la precisión, rango y resolución de la concentración de masa, rango de tamaño de la concentración de masa, vida útil, nivel de emisión acústica y peso del sensor. Estos parámetros son fundamentales para entender el rendimiento y las capacidades del sensor SPS30 en diversas condiciones de uso. Fuente: Ficha técnica.

Descripción gráfica del prototipo:

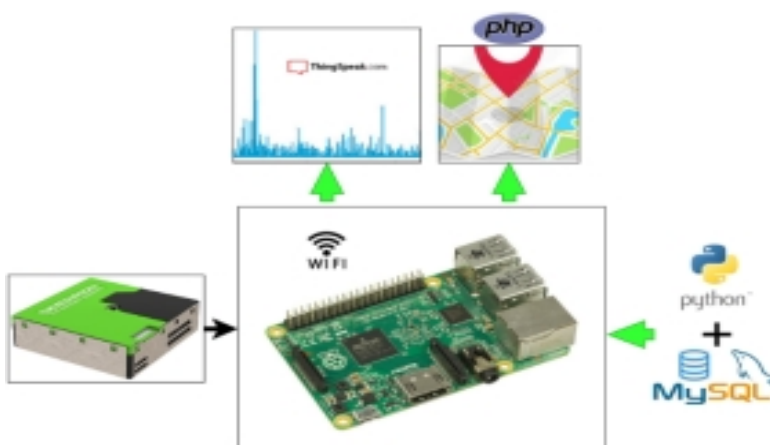
La descripción gráfica del montaje del prototipo está compuesta principalmente por los siguientes elementos:

1. Sensor SPS30
2. Tarjeta Raspberry Pi
3. Base de datos MySQL
4. Código en PHP, HTML y Java Script, para la visualización de la información en la página web
5. Tecnologías IoT
6. Lenguaje de programación Python

Estos componentes son combinados para permitir la visualización de los datos en un mapa de la ciudad. Todo este montaje se puede apreciar en la Figura 2.

Figura 2

Montaje del prototipo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de San Juan de Pasto



Nota. El prototipo está compuesto por el sensor SPS30 y la tarjeta Raspberry Pi. Utiliza una base de datos MySQL y código en PHP, HTML y Java Script para visualizar la información en la página web. Además, hace uso de tecnologías IoT y del lenguaje de programación Python para representar los datos en un mapa de la ciudad.

Criterios de instalación: la base de la estructura se ubica a dos metros de altura, siguiendo los criterios de instalación de AQI de los sistemas de monitoreo establecidos en la Resolución 601 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Para cumplir con este requisito, se diseñó una estructura con estas medidas, como se observa en la Figura 3.

Figura 3

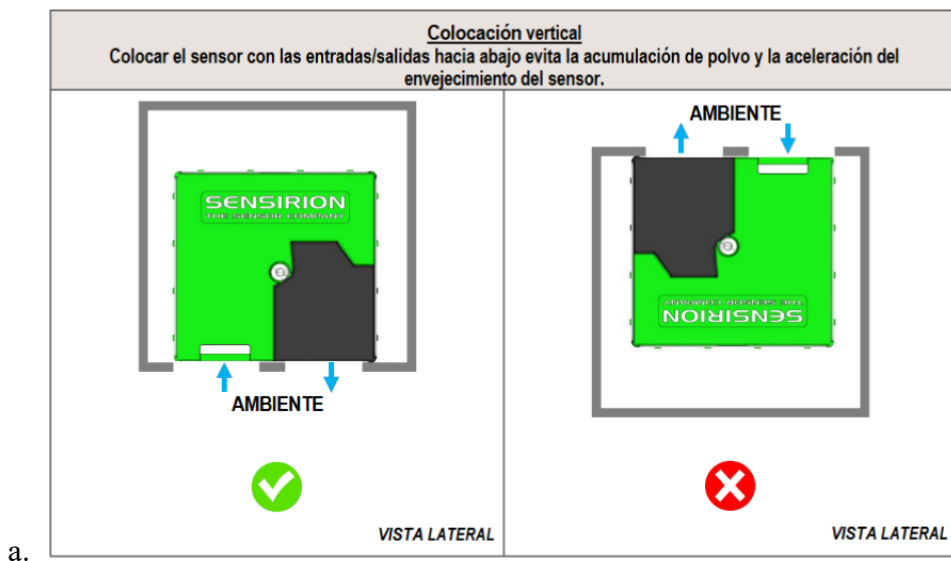
Montaje del prototipo en estructura metálica para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Pasto

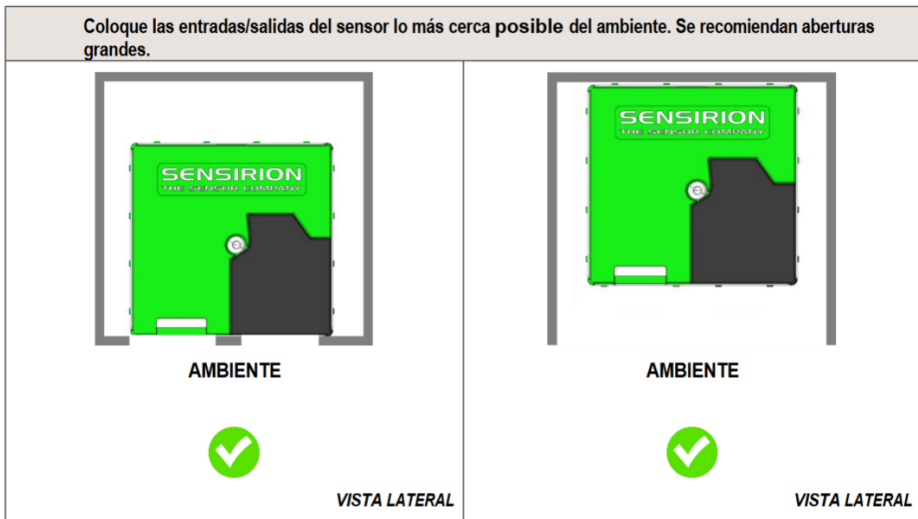


La ubicación óptima del sensor, de acuerdo con la ficha técnica y la revisión de su documentación, se determinó como la más adecuada para el monitoreo del polvo en el medio ambiente, como se ilustra en la Figura 4.

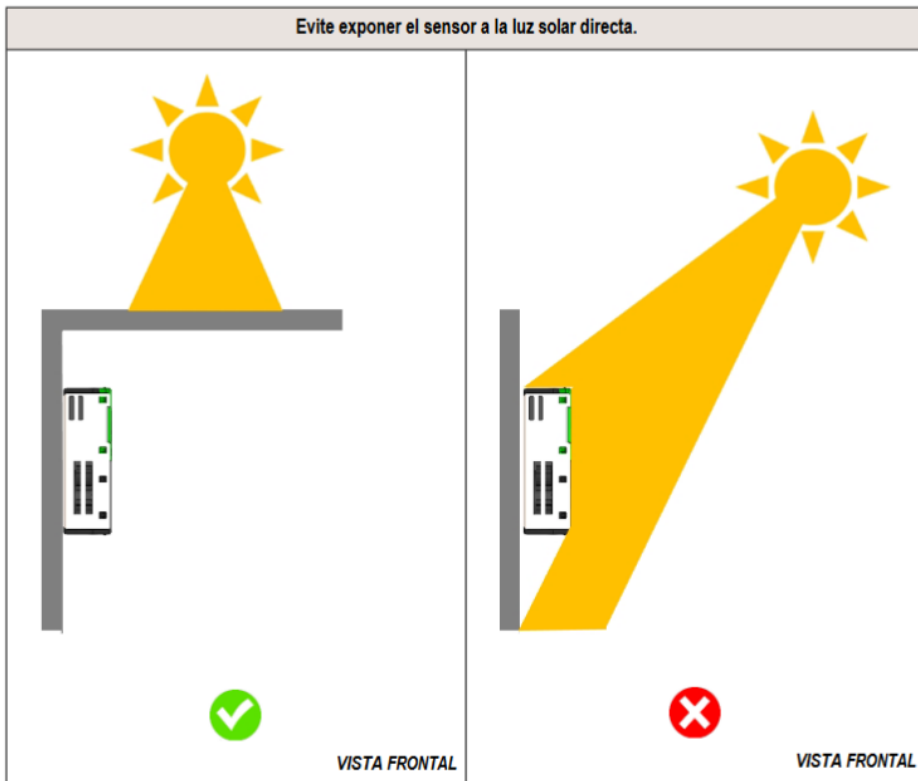
Figura 4

Montaje del prototipo en estructura metálica para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Pasto





b.



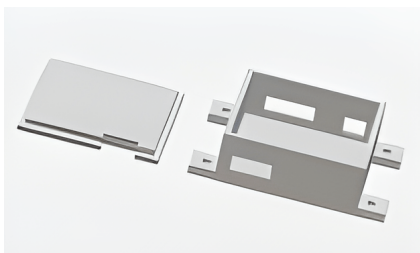
c.

Nota. El montaje adecuado del prototipo del sensor SPS30 requiere seguir las siguientes recomendaciones: a. Instalar el sensor de forma vertical. b. Proporcionar aperturas grandes para una adecuada exposición directa al medio ambiente. c. Evitar exposición directa de la luz solar sobre el sensor. Estas directrices se basan en la ficha técnica del sensor y son fundamentales para asegurar un funcionamiento óptimo y mediciones precisas del dispositivo. Fuente: Ficha técnica.

De esta manera, se asegura que el diseño realizado en impresión 3D en la Figura 5, cumpla con los requisitos de validación externa, garantizando así el cumplimiento del manejo responsable del sensor.

Figura 5

Estructura en impresora 3D del sensor



Nota. Diseño en 3D impreso con el propósito de proteger la estructura del sensor y permitir su adecuada instalación. Este enfoque se basa en las especificaciones detalladas proporcionadas en la ficha técnica del sensor. Ficha técnica.

Prototipo instalado: a continuación, se presenta el prototipo instalado en la base metálica, con su correspondiente estructura de protección. En la Figura 6 se puede apreciar claramente cómo está ubicado y conectado.

Figura 6

Instalación del prototipo sobre su base metálica superior a dos metros de altura



Monitoreo e integración de plataforma IoT: datos en tiempo real

La Figura 7 muestra la integración de la plataforma IoT para el monitoreo de la AQI, permitiendo así la verificación en tiempo real a través de la plataforma ThingSpeak y la página web.

Figura 7

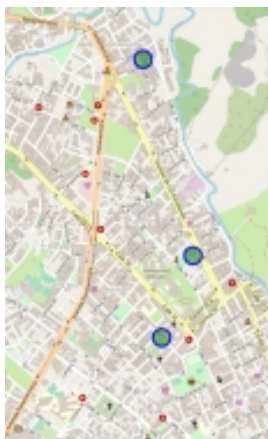
Integración de plataforma IoT para el monitoreo de la calidad del aire y página web personalizable con PHP



La Figura 8 presenta los indicadores de AQI de los puntos de monitoreo, cada uno con su respectivo marcador, que indica el nivel de incidencia de concentración de MP.

Figura 8

Indicadores de calidad de aire de los puntos de monitoreo con su respectivo marcador que indican el nivel de incidencia de concentración de MP



Nota. Los indicadores de AQI son representados mediante colores. En este caso, el color verde indica un nivel bajo de incidencia de concentración de MP.

Pruebas preliminares. La Tabla 3 presenta los puntos de monitoreo, sus respectivas ubicaciones geográficas y direcciones:

Tabla 3

Puntos de monitoreo

Ubicación de los puntos de monitoreo	Coordenadas	Dirección
1. Hotel Morasurco	1,2314885, -77,2832774	Cra. 41
2. Parque Versalles	1,224060, -77,281937	Cra. 33 Cl. 19
3. Museo Madre Caridad Brader	1,220995, -77,283231	Cl. 16B Cra. 32A

Estos puntos de monitoreo han sido seleccionados estratégicamente para obtener una cobertura representativa de diferentes áreas de la ciudad y así realizar un seguimiento de la AQI. En la Tabla 4 se puede apreciar el tiempo de sensado, indicando la fecha, hora de inicio y fin y, la duración del sensado en cada intervalo.

Tabla 4

Tiempo de sensado con la fecha y hora

Día	Horario	Tiempo de Sensado
31/10/2023	3:50 - 4:05	15 minutos
31/10/2023	4:15 - 4:30	15 minutos
31/10/2023	4:40 - 4:55	15 minutos

Estos registros detallados del tiempo de sensado proporcionan información importante sobre la periodicidad y la duración de las mediciones realizadas en cada intervalo de tiempo especificado.

La Tabla 5 muestra las variables ambientales condicionantes tomadas por sitio:

Tabla 5

Variables ambientales condicionantes o condicionales

Temperatura Ambiente (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del Viento (m/s)	Precipitación (mm)
17	78 %	10 SO	0,24
16	78 %	10 SO	0,24
17	81 %	10 S	0,24

Estos datos ambientales son fundamentales para comprender el entorno en el que se lleva a cabo el monitoreo de la AQI y, pueden influir en los resultados obtenidos.

La Tabla 6 muestra las estadísticas obtenidas en los tres puntos de monitoreo:

Tabla 6

Estadísticas obtenidas en los tres puntos de monitoreo

Sitio	Tipo de MP	Promedio	Mínimo	Máximo
1	PM10	1,060	0,5	3,0
	PM2,5	0,828	0,4	2,3
2	PM10	0,969	0,2	1,4
	PM2,5	0,792	0,2	1,4
3	PM10	1,686	0,7	6,4
	PM2,5	1,674	0,7	6,4

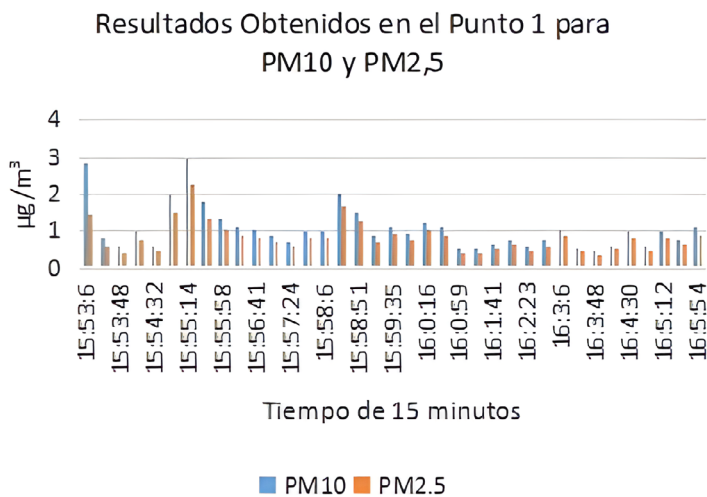
Estas estadísticas proporcionan una visión general de los niveles promedio, mínimos y máximos de material particulado (PM10 y PM2,5) en cada punto de monitoreo, lo que es fundamental para evaluar la AQI en diferentes áreas de la ciudad.

Análisis de datos

A continuación, se muestra la observación de los datos recopilados para cada punto de monitoreo.

Figura 9

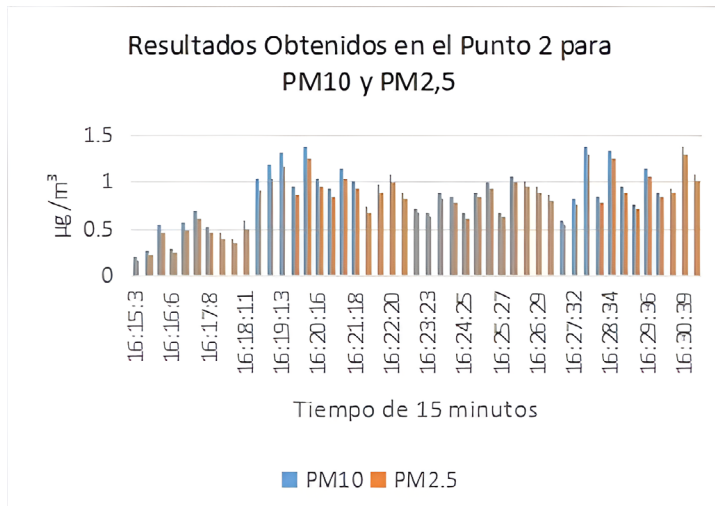
Observación de los datos recopilados del punto de monitoreo 1



Nota. Se realizó en sitio 1 durante un período de 15 minutos y presentó un valor máximo de 3 µg/m³.

Figura 10

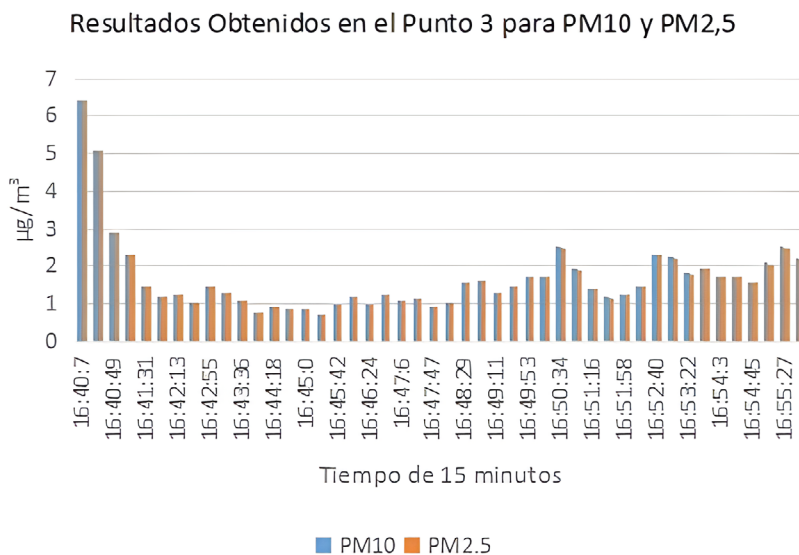
Observación de los datos recopilados del punto de monitoreo 2



Nota. Este punto de monitoreo en sitio 2, ubicado consecuentemente al anterior, se obtuvo en máximo de $1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante los 15 minutos de observación.

Figura 11

Observación de los datos recopilados en el punto de monitoreo 3



Nota. Este último punto de monitoreo, expuesto a fuentes de contaminación, registró un valor máximo de $6,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un promedio de $1,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el período de observación de 15 minutos.

Conclusiones

El desarrollo y la implementación del prototipo para el monitoreo de la AQI en la ciudad de San Juan de Pasto, utilizando sensores NDIR, representan un avance significativo en la capacidad de medir y comprender la AQI en la ciudad. A partir de la revisión bibliográfica y la selección cuidadosa del sensor SPS30 de Sensirion, se logró un prototipo que cumple con altos estándares de calidad, durabilidad y precisión en la medición de MP. La instalación del sensor, siguiendo criterios específicos de montaje, garantiza mediciones confiables y permite su utilización para respaldar políticas ambientales y de salud pública, cumpliendo así con los requisitos regulatorios establecidos.

Una de las ventajas destacadas de este prototipo es la reducción significativa de costos en comparación con dispositivos más grandes y complejos, lo que lo hace más accesible y viable para implementaciones a mayor escala. Además, la estrategia de visualización y difusión de datos mediante la presentación efectiva en un mapa de la ciudad, facilita la comprensión de la información por parte del público en general, lo que es crucial para aumentar la conciencia sobre la AQI y fomentar acciones informadas hacia su mejora.

Es importante destacar que la aplicabilidad de este prototipo y metodología no se limita únicamente al contexto de San Juan de Pasto, sino que tiene el potencial de ser adaptado y replicado en otras ciudades o regiones con problemas similares de AQI. Para continuar mejorando y ampliando el impacto de este proyecto, se sugiere varias líneas de investigación y desarrollo futuro, como la integración de sensores adicionales para proporcionar una imagen más completa de la AQI, la implementación de algoritmos de predicción para anticipar cambios en la AQI, la creación de alertas tempranas sobre picos de contaminación, la identificación de fuentes de contaminación y medidas de mitigación y, la optimización continua de la plataforma IoT para garantizar su escalabilidad y eficiencia en la recopilación y presentación de datos.

Finalmente, el proyecto representa un paso importante hacia el monitoreo y la gestión efectiva de la AQI en San Juan de Pasto, con el potencial de generar impactos positivos tanto a nivel local como en otras áreas con desafíos similares.

Referencias

- Área Metropolitana Valle de Aburrá. (2019). Estudio Eventos en salud asociados a la contaminación del aire. <https://www.metropol.gov.co/Paginas/Noticias/estudio-eventos-en-salud-asociados-a-la-contaminacion-del-aire.aspx#>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2017). Informe sobre el estado de la calidad del aire. Abril de 2017. <https://www.corponarino.gov.co/expedientes/calidadambiental/aire/InformeAireAbril2017.pdf>
- Dhingra, S., Madda, R. B., Gandomi, A. H., Patan, R., & Daneshmand, M. (2019). Internet of things mobile-air pollution monitoring system (IoT-Mobair). *IEEE Internet of Things Journal*, 6(3), 5577-5584. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2903821>
- Hawari, H. F., Zainal, A. A., & Ahmad, M. R. (2019). Development of real time internet of things (IoT) based air quality monitoring system. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 13(3), 1039-1047. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v13.i3.pp1039-1047>
- Karar, M. E., Al-Masaad, A. M., & Reyad, O. (2020). Gasduino-wireless air quality monitoring system using internet of things. *Information Sciences Letters*, 9(2), 113-117. <https://doi.org/10.18576/isl/090208>
- Malche, T., Maheshwary, P., & Kumar, R. (2019). Environmental monitoring system for smart city based on secure Internet of Things (IoT) Architecture. *Wireless Personal Communications*, 107(4), 2143-2172. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06376-0>
- Marques, G., Ferreira, C. R., & Pitarma, R. (2019). Indoor air quality assessment using a CO 2 monitoring system based on Internet of Things. *Journal of Medical Systems*, 43(3). <https://doi.org/10.1007/s10916-019-1184-x>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2005). OPS/OMS Colombia - Nueve de cada 10 personas en todo el mundo respiran aire contaminado, pero más países están tomando acciones. https://www.paho.org/col/index.php?option=com_content&view=article&id=2958:nueve-de-cada-10-personas-en-todo-el-mundo-respiran-aire-contaminado-pero-mas-paises-estan-tomando-acciones&Itemid=562

- Onursal, B. & Gautam, S. P. (1997). Contaminación por vehículos automotores. Experiencias recogidas en siete centros urbanos de América Latina. https://documents1.worldbank.org/curated/en/136631468263934974/pdf/WTP37310SPANISH.pdf?_gl=1*130r9y5*_gcl_au*MTYONTEzMzE4NS4xNzE5MzQ3MDQ5
- Pu'ad, M., Gunawan, T. S., Kartiwi, M., & Janin, Z. (2019). Performance evaluation of portable air quality measurement system using raspberry Pi for remote monitoring. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(2), 564-574. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp564-574>
- Resolución 601 de 2006. (2006, 4 de abril). Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/resolucion-601-de-2006.pdf>
- Sans, R. y Ribas, J. (1989). *Ingeniería Ambiental: Contaminación y Tratamientos*. Marcombo Boixareu Editores.
- Suriano, D. (2021). A portable air quality monitoring unit and a modular, flexible tool for on-field evaluation and calibration of low-cost gas sensors. *HardwareX*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2021.e00198>
- Taştan, M. & Gökozan, H. (2019). Real-time monitoring of indoor air quality with internet of things-based e-nose. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(16). <https://doi.org/10.3390/app9163435>
- Tyler, N., Acevedo, J., Bocarejo, J. P. y Velásquez, J. M. (2013). *Caracterización de la contaminación atmosférica en Colombia*. University College London y Universidad de los Andes.
- Zakaria, N. A., Abidin, Z. Z., Harum, N., Hau, L. C., Ali, N. S., & Jafar, F. A. (2018). Wireless internet of things-based air quality device for smart pollution monitoring. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 9(11), 65-69. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2018.091110>
- Zheng, K., Zhao, S., Yang, Z., Xiong, X., & Xiang, W. (2016). Design and implementation of LPWA-Based Air Quality Monitoring System. *IEEE Access*, 4, 3238-3245. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2582153>

Capítulo 6.

Evaluación de la aplicación del proyecto Ambiental Escolar PRAE de la IEM Ciudad de Pasto

Santiago Miguel Hernández Erazo

Paula Andrea Toledo Hurtado

Luz Nathalia Torres Martínez

Cítese como: Hernández-Erazo, S. M., Toledo-Hurtado, P. A. y Torres-Martínez, L. N. (2024). Evaluación de la aplicación del proyecto Ambiental Escolar PRAE de la IEM Ciudad de Pasto. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 85-95). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c424>

Resumen

Este estudio se concentra en la evaluación del impacto del Proyecto Ambiental Escolar (PRAE) en la Institución Educativa Municipal Ciudad de Pasto sobre la comunidad educativa. Con el objetivo de alcanzar este propósito, se estableció metas específicas que, inicialmente, incluyeron un diagnóstico para identificar las dificultades que la comunidad educativa enfrenta en la implementación adecuada del PRAE. La metodología empleada abarcó una investigación evaluativa con enfoque mixto (cualitativo, cuantitativo), utilizando herramientas como encuestas, árbol de problemas y matriz DOFA.

Los resultados del estudio pusieron de manifiesto deficiencias en la educación ambiental en todos los niveles, evidenciando la falta de conciencia ambiental y prácticas inapropiadas de gestión de residuos entre los estudiantes de grados inferiores. Aunque los docentes, administrativos y directivos demostraron un entendimiento más sólido del PRAE, se destacó la falta de compromiso general para integrar la educación ambiental en todas las áreas curriculares. Se subrayó la necesidad de promover el proyecto de manera más efectiva y de implementar políticas de educación ambiental.

Entre las debilidades identificadas se encontró la gestión ineficiente de residuos sólidos, la limitación de fondos dependientes de entidades gubernamentales y, la falta de colaboración y compromiso de la comunidad educativa en la educación ambiental del PRAE. Por otro lado, se resalta oportunidades como la colaboración activa con entidades públicas y privadas para actividades sostenibles, así como el cumplimiento de los lineamientos legales y la reputación destacada del colegio en la ciudad de Pasto. No obstante, se señaló la necesidad de abordar la falta de participación activa en el PRAE, afectando la comprensión del programa y generando resistencia al cambio de mentalidad.

Palabras clave: Proyecto Ambiental Escolar (PRAE); comunidad educativa; estrategias; deficiencias, educación ambiental

Introducción

La investigación se llevó a cabo en la Institución Educativa Municipal (IEM) Ciudad de Pasto, una institución pública ubicada en la zona urbana de Pasto, departamento de Nariño. Su selección se basó en el reconocimiento, como una de las mejores de la ciudad, con una destacada trayectoria educativa.

El enfoque principal de la investigación fue la evaluación de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), con una definición proporcionada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Educación Nacional (2003) y, el Ministerio de Educación Nacional de Colombia (MEN, 2005), que destaca su papel en el análisis de problemas y potencialidades ambientales locales, generando espacios participativos para implementar soluciones acordes con dinámicas naturales y socioculturales. La necesidad de mantener una estrecha relación entre el ser humano y el medio ambiente se resalta como crucial, ya que ambas entidades se complementan mutuamente. La investigación se centra en comprender el proceso de estos proyectos, reconociendo su impacto directo en la sociedad, particularmente en la comunidad ambiental de la IEM Ciudad de Pasto y su relación con el entorno.

Se considera el impacto de la evaluación de programas y proyectos ambientales, dado el carácter académico y público de la institución, desde una perspectiva de Ingeniería Ambiental. La investigación se fundamenta en la pregunta central: ¿Bajo qué términos y estrategias se ejecuta el PRAE en la IEM Ciudad de Pasto de Pasto - Nariño?

La metodología adoptada es de carácter mixto, combinando enfoques cualitativos y cuantitativos, con un tipo de estudio observacional y etnográfico. Las técnicas de recolección de información incluyen entrevistas en grupos focales, árbol de problemas y observación participante. La población sujeta de estudio abarca estudiantes, docentes, administrativos y grupo de apoyo de la institución. En la presentación del avance de la investigación, se destaca la sistematización de la información, describiendo la ruta metodológica que abarca la síntesis del proceso, el diseño y validación de instrumentos, la aplicación de técnicas de recolección de información y la construcción de proposiciones. Además, se aborda la población sujeta de estudio, incluyendo estudiantes, docentes y administrativos de la IEM Ciudad de Pasto.

El análisis e interpretación de resultados se basa en respuestas y opiniones de los participantes, contrastadas teóricamente con la opinión de expertos en el tema ambiental y su relación con la sociedad. Se presenta conclusiones y recomendaciones elaboradas por el grupo de investigadores, dirigidas al mejoramiento ambiental y la calidad educativa.

Desarrollo del tema

Metodología: para llevar a cabo este proyecto, se emplea una investigación evaluativa centrada en el análisis de la implementación del PRAE en la institución. Para ello, se lleva a cabo una investigación durante la ejecución del mismo, utilizando un enfoque mixto que integra métodos cualitativos y cuantitativos para la recopilación y análisis de datos. Estos métodos contribuyen a abordar la pregunta de investigación y a validar la tesis establecida en este estudio.

Diseño metodológico: constituye un modelo estadístico con el propósito de explorar la posible influencia de factores específicos en una variable de interés. En el caso de que se identifique alguna influencia, se busca cuantificar dicho impacto.

Tabla 1

Diseño metodológico de investigación de la evaluación del PRAE de la IEM Ciudad de Pasto

Evaluación de la aplicación del PRAE de la IEM Ciudad de Pasto			
Título	Evaluación de la aplicación del PRAE de la IEM Ciudad de Pasto		
Objetivo general	Evaluar el impacto que tiene en la comunidad educativa el PRAE de la IEM Ciudad de Pasto		
Objetivos específicos	Metas	Actividades	Producto
Identificar las dificultades y problemas que tiene que la comunidad educativa de la IEM Ciudad de Pasto para la correcta aplicación del PRAE	<ul style="list-style-type: none"> Con la identificación de problemas, buscar una solución para la adecuada implantación del PRAE 	<ul style="list-style-type: none"> Reconocimiento de la zona de estudio Caracterizar los métodos y estrategias empleados en la aplicación del PRAE por parte de la IEM Ciudad de Pasto Realización de encuestas Ejecución de encuentros con los grupos. Realización de taller del árbol de problemas con los grupos focales Matriz de priorización Realización de la Matriz DOFA Trabajo de grupos focales 	<ul style="list-style-type: none"> Análisis de las respuestas a las encuestas, el árbol de problemas y Matriz DOFA Análisis del taller con los grupos focales Triangulación de la información para verificar y analizar los resultados de la metodología e implantación
Proponer estrategias para la reconstrucción del PRAE de acuerdo con la normativa vigente por medio de asesoría y seguimiento según la problemática ambiental presente en la IEM Ciudad de Pasto, Pasto-Nariño	<ul style="list-style-type: none"> Aportar con métodos cualitativos al actual PRAE, acorde con las necesidades encontradas 	<ul style="list-style-type: none"> Taller de validación con los grupos focales. Matriz de actividades donde se propone las estrategias que se debe implementar según los resultados obtenidos en la matriz de priorización, para que el PRAE sea exitoso 	<ul style="list-style-type: none"> El PRAE de la IEM Ciudad de Pasto está acorde con el esquema de contenido del PRAE establecido por la Secretaría de Educación y la Alcaldía Municipal de la ciudad de Pasto.

Tipo de investigación: el estudio adopta una perspectiva evaluativa, ya que se enfoca en la evaluación del propósito de la investigación, en lugar de adscribirse a un método específico. Este enfoque contribuye al enriquecimiento del conocimiento, mejora la toma de decisiones y, se traduce en aplicaciones prácticas en entornos del mundo real. Asimismo, se dispone de múltiples métodos, como encuestas y experimentos, para llevar a cabo el proceso. La metodología implica la realización de un análisis de datos y la presentación de informes de manera rigurosa y sistemática, con la recopilación de datos orientada hacia una institución educativa pública, en este caso, particular.

Población y Muestra: la IEM Ciudad de Pasto proporciona tres niveles de educación formal de acuerdo con los estándares establecidos por el MEN. Se caracteriza como una institución oficial que dispone de dos jornadas educativas, tanto en la mañana como en la tarde. En cuanto al nivel de educación básica, se encuentra representado por los grados sexto, séptimo, octavo y noveno, que cuentan con un total de 24 cursos; para el nivel de educación media, los grados décimo y decimoprimeros tienen un total de ocho cursos, por lo tanto, la muestra representativa es de 32 cursos, con una población estudio de 1050 estudiantes, 43 docentes, 20 administrativos y dos directivos.

Una vez determinada la población total de estudio se realiza el respectivo cálculo de la muestra en el cual se utilizó la siguiente fórmula estadística:

Ecuación 1

Cálculo de la Muestra

$$m = \frac{N}{(N - 1) * K^2 + 1} = \frac{1115}{((1115 - 1) * (0,05^2) + 1)} = 295 \text{ personas}$$

m = muestra

N = Población

K = margen de error → 5 % → 0,05

Obteniendo una muestra representativa de 295 personas, incluyendo estudiantes, docentes, administrativos y directivos. organizados de la siguiente manera:

- Docentes, administrativos y directivos: 39 personas
- Grado sexto: 56 estudiantes
- Grado séptimo: 56 estudiantes
- Grado octavo: 48 estudiantes
- Grado Noveno: 32 estudiantes
- Grado décimo: 32 estudiantes
- Grado decimoprimeros: 32 estudiantes.

Instrumentos de investigación: los instrumentos utilizados para la investigación permiten obtener información correspondiente a los objetivos planteados y responder a la hipótesis planteada, brindando una correcta información y recolección de datos. Estos fueron:

- Observación
- Encuesta
- Árbol de problemas
- Matriz de priorización
- Matriz DOFA
- Grupo focal.

Resultados Primer Objetivo

Grupos focales: se vio la necesidad de dar un orden al diagnóstico por medio de tres grupos focales que fueron determinados a partir de la función que cumplen en la institución educativa, su edad y profesión. Con el fin de llevar a cabo la evaluación, se procedió a segmentar la muestra en tres grupos focales específicos, de la siguiente manera:

Tabla 2

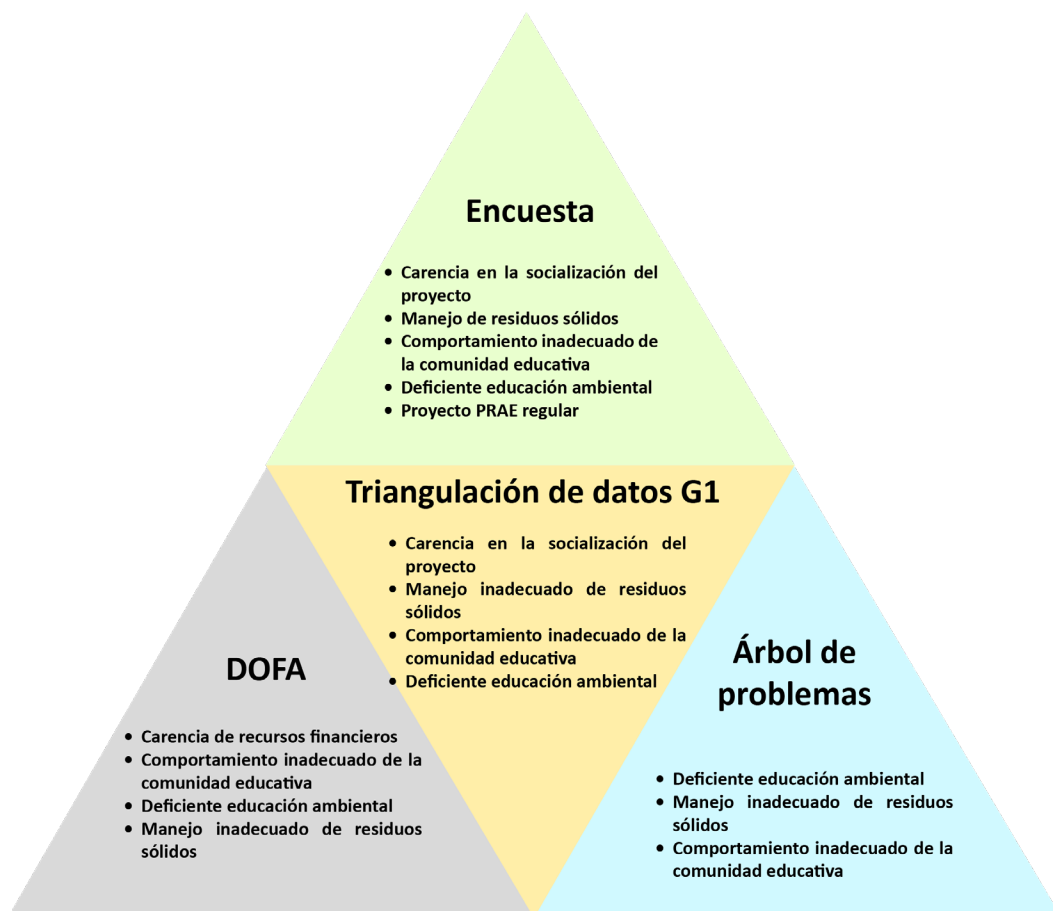
Clasificación de grupos focales según sus participantes

Grupo focal	Participantes
1	Estudiantes de grados sexto a octavo
2	Estudiantes de grados noveno a decimoprimeros
3	Docentes, administrativos y directivos

De acuerdo con el diagnóstico obtenido por medio de los instrumentos de investigación utilizados, se registra un resumen de los mismos por medio de una triangulación de la información, como se puede evidenciar en la Figura 1:

Figura 1

Triangulación de datos de los grupos focales



Tras realizar el análisis de la triangulación de datos recopilados de los grupos focales 1, 2 y 3, se ha identificado deficiencias significativas en la institución, que obstaculizan el buen funcionamiento de los proyectos ambientales propuestos. Así, en los tres grupos focales se destaca la falta de una socialización conjunta de los PRAE, que impide la participación activa de la comunidad educativa en las actividades relacionadas con los proyectos ambientales. La falta de socialización adecuada conlleva la aparición de diversas problemáticas ambientales, como la gestión inadecuada de residuos sólidos y la utilización incorrecta de la infraestructura institucional. Estas problemáticas indican la ausencia de un sentido de pertenencia por parte de los estudiantes hacia la institución, lo cual resulta en el deterioro de las áreas verdes, el uso indebido de los muebles y un inapropiado uso de los servicios sanitarios. Estas situaciones generan malestar entre los miembros de la comunidad y afectan negativamente el entorno. En

consecuencia, se genera conflictos que afectan la formación académica y social de los estudiantes, lo que limita su capacidad para contribuir significativamente a la sociedad en temas de sostenibilidad.

Resultados Objetivo 1

Se identificó las problemáticas de mayor relevancia en la institución, con el propósito de enfocar los esfuerzos hacia su resolución y así, mejorar la convivencia educativa.

En este análisis se determinó que, la gestión de residuos sólidos es uno de los aspectos más relevantes a abordar en la institución; por ende, es imperativo contemplar y ejecutar enfoques que complementen el propósito de abordar esta problemática, la cual, a pesar de haber sido abordada mediante la disminución de desechos, aún requiere un esfuerzo adicional para su resolución completa. Por otro lado, se puede constatar que la problemática relacionada con el comportamiento inadecuado de la comunidad educativa hacia la institución, es atribuible a la carencia de una cultura y educación ambiental adecuada, que es el tercer problema identificado en la evaluación. Esta situación se manifiesta en la falta de sentido de pertenencia hacia las áreas verdes, los baños y la infraestructura en general. Por otra parte, se observa contaminación visual, considerando imperioso llevar a cabo actividades que permitan mejorar las diferentes áreas de la institución, siendo prioritarias las aulas de clase, en las que se presenta este problema con mayor relevancia, para que los estudiantes tengan un ambiente sano de estudio. Por último, es necesario destacar la deficiente socialización del PRAE dentro de las aulas de clase, evidenciándose de manera significativa.

Segundo Objetivo

Taller de validación

Por medio de un taller de validación se obtuvo la aprobación de todos los participantes, en el cual estuvieron de acuerdo con el diagnóstico obtenido en el objetivo 1. Este alto nivel de consenso y aceptación sugiere que las ideas y propuestas presentadas han sido ampliamente respaldadas y que no existen desacuerdos significativos entre los participantes. Estos resultados son verificados, en gran medida, debido al apoyo y la participación activa de toda la comunidad perteneciente a la IEM Ciudad de Pasto a lo largo de todo el proceso de diagnóstico.

Fase de Formulación de Proyectos: se definió proyectos que abarquen y resuelvan los problemas diagnosticados en cuanto al PRAE de la IEM Ciudad de Pasto, entre los cuales, los enfoques a tratar son los siguientes:

- Educación ambiental y sociocultural
- Contaminación visual y manejo de residuos sólidos
- Socioeconómicos y/o embellecimiento de la institución
- Gestión ambiental.

Por lo tanto, en cada uno de los elementos señalados se definió acciones y objetivos de acuerdo con las problemáticas y potencialidades identificadas en el PRAE de la IEM Ciudad de Pasto, involucrando a toda la comunidad educativa. Además, fue necesario implementar durante esta fase, programas que permitieran resolver las dificultades encontradas a lo largo del estudio, considerando los propósitos de un PRAE, siendo realizados en proyectos de corto, mediano y largo plazo.

Para elaborar estos proyectos, se tuvo en cuenta, principalmente, el esquema de contenidos del PRAE establecido por la Secretaría de Educación y la Alcaldía Municipal de la ciudad de Pasto y, el Proyecto Educativo Institucional (PEI) colombiano, en el cual se especifica que el proyecto PRAE de todas las instituciones debe estar dentro del marco que se establece, razón por la cual se validó el proyecto PRAE de la IEM Ciudad de Pasto actual y los documentos mencionados que alinean la estructura que debe tener este proyecto en Colombia, entendiendo que en el capítulo III “Elementos estructurales del PRAE” se aprecia las áreas puntuales en las cuales se debe mejorar el PRAE en mención, definiendo la fase de formulación en proyectos de educación ambiental y sociocultural, contaminación visual y manejo de residuos sólidos, socioeconómicos y/o embellecimiento de la institución y gestión ambiental.

Esto permitirá que el proyecto PRAE tenga el impacto necesario para que cada uno de sus integrantes lo conozca y tenga más educación; por ende, una mayor conciencia ambiental, que es el fin de este estudio, permitiendo además que la institución no solo sea reconocida por su excelencia académica y deportiva, sino también por la correcta implementación de este proyecto tan importante para generar ciudadanos con mayor empatía ambiental.

Conclusiones

Considerando que los proyectos escolares constituyen una efectiva estrategia para fomentar el compromiso y la conciencia ambiental en estudiantes, docentes y personal administrativo, la IEM Ciudad de Pasto ha demostrado su compromiso al adaptar su PRAE. Este ajuste contempla aspectos clave como la sostenibilidad, el manejo apropiado de residuos sólidos, la promoción de entornos saludables y la preservación del medio ambiente.

Un beneficio fundamental de los PRAE radica en capacitar a los estudiantes en la gestión adecuada de residuos sólidos, un aspecto esencial en el espacio ambiental. La introducción de la educación ambiental en las aulas se vuelve crucial, considerando especialmente la falta de conocimiento en un significativo grupo de estudiantes, quienes carecen de una formación que impulse la preservación ambiental. Los PRAE no solo abordan problemáticas ambientales, sino que generan impactos sociales y económicos positivos.

La institución enfrenta desafíos, como la presencia de basura en áreas verdes, paredes y mesas vandalizadas debido a la falta de educación y sentido de pertenencia en los estudiantes. A pesar de esto, se destaca el buen funcionamiento del colegio, evidenciado en un cambio de mentalidad en los estudiantes. Los resultados y análisis revelan que la mayoría tiene conocimientos sobre el PRAE y sus objetivos, demostrando una mayor oportunidad para aprender sobre temas fundamentales como la protección del entorno y el manejo adecuado de residuos sólidos. Esto les posiciona como ciudadanos conscientes y responsables, adquiriendo habilidades y conocimientos prácticos de manera participativa.

Referencias

Ministerio de Educación Nacional (MEN). (2005). Educar para el desarrollo sostenible. Altablero No. 36. <https://www.mineducacion.gov.co/1621/article-90893.html>

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Educación Nacional. (2003). Educación Ambiental. Política Nacional. <https://www.uco.edu.co/extension/prau/Biblioteca%20Marco%20Normativo/Politica%20Nacional%20Educacion%20Ambiental.pdf>

Capítulo 7.

Evaluación del desempeño de un sistema de condensación de gas de pirólisis de llantas a escala de laboratorio

Claudio Alberto Moreno Arias

Oscar Chamarraví Guerra

Cítese como: Moreno-Arias, C. A. y Chamarraví-Guerra, O. (2024). Evaluación del desempeño de un sistema de condensación de gas de pirólisis de llantas a escala de laboratorio. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 96-111). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c425>

Resumen

Este documento presenta los resultados más relevantes de las pruebas realizadas en el proceso de pirólisis a escala de laboratorio de residuos de llantas, del proyecto macro ‘Valoración de llantas con enfoque de economía circular’ desarrollado por la Universidad de América y el SENA. Como objetivos, se buscó identificar las variables y condiciones más óptimas que permitieran la selección del proceso más adecuado de descomposición térmica, diseñar y construir un reactor pirolítico o pirolizador a escala de laboratorio y, por último, analizar el subproducto líquido obtenido de la pirólisis.

Como resultados más destacados se logró la escogencia del tipo de pirólisis más adecuado para las condiciones del laboratorio, se diseñó y construyó el pirolizador a escala de laboratorio con materiales descartados y reciclados, además de realizar un análisis de las fracciones refinadas del líquido de pirólisis obtenido (*black oil*), para determinar su viabilidad de uso en motores de combustión. El producto obtenido no presentó las mejores características para probarse en motores de combustión, pero dejó sentadas las bases para continuar investigando sobre su purificación y posterior implementación.

Es de destacar que el proyecto se llevó a cabo con el trabajo del equipo conformado por docentes investigadores, tesis de pregrado en ingeniería mecánica y semilleros del Grupo IENA.

Palabras clave: neumáticos fuera de uso; economía circular; pirólisis de llantas; pirolizador; reactor pirolítico

Introducción

El aumento en la generación de llantas de desecho también podría atribuirse al crecimiento de la industria automotriz. Los neumáticos fuera de uso (NFU) hacen referencia a las llantas que se desecharon por desgaste, defectos o daños y, que no ofrecen condiciones de seguridad en la operación de un vehículo en la vías y carreteras. Anualmente, se generan más de 1.400 millones de llantas de desecho a partir de diversas fuentes vehiculares, con cerca de 166 millones de toneladas estadounidenses que se desecha cada año.

Con el aumento de la población del planeta, la demanda de neumáticos también aumenta. Anualmente, en Tailandia, se generan entre 400.000 y 600.000 toneladas de llantas de desecho (Mmerekki et al., 2019). China desecha alrededor de 112 millones de llantas al año, mientras que, en Estados Unidos, la cantidad de llantas desechadas supera los 246 millones al año (Berendsohn, 2018). Europa genera hasta cuatro millones de toneladas de NFU cada año (Rogachuk y Okolie, 2023), debido a los avances en la industrialización y la urbanización; se prevé que estas cifras relacionadas con la producción de llantas descartadas continúen incrementando anualmente.

La vida útil promedio de un neumático es de 3 a 6 años. Una vez alcanzada, este se desecha en un vertedero, se recicla o se recaucha. Sin embargo, su eliminación inadecuada conlleva un problema medioambiental serio. La eliminación de llantas de desecho en vertederos puede provocar la contaminación de las aguas subterráneas y los cursos de agua. Además, puede dañar el ecosistema local, ya que libera químicos tóxicos que impactan el suelo. Estos contaminantes también impactan el ecosistema, ya que atrapan el agua lluvia, facilitando la proliferación de mosquitos y otros insectos. Además, la composición química de los neumáticos los hace altamente resistentes a la degradación, lo que agrava el impacto ambiental de su eliminación inadecuada. Dados los riesgos ambientales y de salud asociados con la eliminación de NFU, es fundamental implementar una estrategia de gestión eficaz.

La composición de las llantas descartadas las convierte en una fuente adecuada para la producción de materiales a base de carbono. Su alto poder calorífico (28–37 MJ kg⁻¹) y el bajo contenido de minerales las convierte en una valiosa

fuentes de energía potencial. Sin embargo, su conversión de desecho en energía o materiales para su almacenamiento, a través de métodos como la incineración o la combustión, también puede generar serios problemas ambientales. Como resultado, se han llevado a cabo diversos estudios sobre su conversión termoquímica para este propósito; dentro de estos se ha encontrado que su diversa composición las convierte en una fuente deseable para la producción de materiales a base de carbono. El alto poder calorífico (28–37 MJ kg⁻¹) y el bajo contenido de minerales las convierte en una valiosa fuente de energía potencial (Frikha et al., 2022)

Los neumáticos de automotores tienen una vida útil de diez años, incluyendo dos reencauches. (Thomas et al., 2014). Se ha reportado que India descarta alrededor de 112 millones de llantas cuya generación, disposición y manejo son de especial interés. En la mayoría de los países en desarrollo, las áreas limitadas para relleno sanitario, servicios inadecuados y conocimiento limitado sobre cómo reciclar este residuo en aplicaciones de valor, se convierte en una seria amenaza. Adicionalmente, su abandono a cielo abierto las hace una fuente de generación de proliferación de zancudos transmisores de malaria, paludismo, chiconguña, dengue, entre otros (Awolusi et al., 2019; World Health Organization, 2019).

Esta problemática no es ajena a Colombia; se resaltan hechos como los descritos por la Revista Semana (2021): se estima que una sola llanta de camión necesita medio barril de petróleo crudo para su proceso de fabricación y, en su descarte, genera emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. En Colombia en el año 2020, fueron importadas 1.350.000 llantas, de las cuales se reencauchó solo un 29 %. El total de las usadas que terminaron en calles y rellenos sanitarios fue de 958.500 unidades. El Decreto 442 de 2015 (Secretaría Distrital de Ambiente, s.f.) prohíbe abandonarlas en espacio público, enterrarlas como método de eliminación y disposición final, almacenarlas a cielo abierto o, utilizarlas en procesos de combustión. De acuerdo con la Cámara de Comercio de Bogotá (2006), dentro de los impactos ambientales que se tiene como consecuencia de la mala gestión, destaca la quema a cielo abierto, en la cual las emisiones liberadas contienen contaminantes como material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COVs). Incluyen también, contaminantes peligrosos como hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), dioxinas, furanos, cloruro de hidrógeno, benceno, bifenilos policlorados (PCBs), y metales pesados como arsénico, cadmio, níquel, zinc, mercurio, cromo y vanadio. La exposición de las personas a este tipo de emisiones genera impactos significativos a la salud, tanto agudos (de corta duración), como crónicos (de larga duración). Estos efectos pueden incluir irritación de la piel, ojos y membranas mucosas, depresión del sistema nervioso central, efectos respiratorios y cáncer -efectos mutagénicos-.

Dentro de los beneficios ambientales que traería el reencauche de este tipo de residuo, se destacan:

- Una llanta reencauchada utiliza únicamente el 32 % del petróleo usado en una llanta nueva
- La fabricación de una llanta nueva requiere de 2 m³ de agua, por tonelada, mientras que el reencauche demanda solo 0,35 m³
- El proceso de reencauche reduce la emisión de compuestos orgánicos volátiles COV en un 69 %, en comparación con una nueva
- Con el reencauche se logra una reducción de hasta el 63 % de residuos sólidos.

Materiales y Métodos

Proceso de pirólisis

La pirólisis es un proceso a través del cual un material orgánico (preferiblemente residuos) se descompone térmicamente en una atmósfera inerte (en ausencia de oxígeno u otras sustancias oxidantes), resultando en productos que se presentan en tres fases: sólida (residuo carbonoso), líquida (alquitranes, aceites y combustible) y gaseosa (gases de síntesis). El rango de temperaturas en las que oscila este proceso es de 150- 900 °C con un promedio de 600 °C (Castells, 2005). Si bien este proceso no es eficiente desde el punto de vista energético debido a que requiere de mucha energía para alcanzar esos rangos de temperaturas, se combina con el proceso de gasificación y de combustión. A pesar de esto, es justificable, dado el valor agregado que se le puede dar a la materia prima y el amplio rango de productos útiles potenciales y con una reducción significativa en los impactos ambientales en comparación con la quema a cielo abierto.

La técnica de pirólisis aplicada para el reaprovechamiento de residuos de difícil disposición como los NFU puede llegar a ofrecer utilidades significativas mediante la valorización de los productos generados debido a su alta demanda, considerando las aplicaciones que tienen como materia prima y su capacidad de transformación en nuevos productos.

De acuerdo con la combinación de las condiciones de operación del equipo, la pirólisis se puede clasificar en varios grupos que difieren entre sí, según se observa su comparación en la Tabla 1. Entre las condiciones que pueden variar, se encuentran las siguientes: tasa de calentamiento, ambiente de reacción, uso de catalizadores, tiempo de retención, forma de calentamiento, velocidad de calentamiento y, presión, entre otros.

Tabla 1

Tipos de pirólisis

Tipo de pirólisis	Condiciones	Velocidad de calentamiento (°C/s)	Líquido (%)	Carbón (%)	Gas (%)
Flash/Rápida	500 °C, 1 s de tiempo de residencia de vapor caliente	500	75	12	13
Intermedio	500 °C, tiempo de residencia de vapor caliente 10-30 s.	17 a 50	50	25	25
Carbonización lenta	400 °C tiempo de residencia del vapor en horas o días	<<1	30	35	35
Torrefacción lenta	290 °C tiempo de residencia de sólidos ~30 min.	<<1	NA	82	18

Nota. Castells (2005).

Dependiendo del rango de temperatura, la pirólisis se clasifica en los tipos que se indican en la Tabla 2.

Tabla 2

Reacciones producidas en procesos de pirólisis

Rango de temperatura (°C)	Reacción química
100-120	Deshidratación.
250	Desoxigenación y desulfuración. Inicio de liberación de sulfuro de hidrógeno.
340	Roturas de enlaces en compuestos alifáticos. Liberación de metano y otros compuestos alifáticos.
380	Fase de carbonización. Concentración de carbón en residuos.
400	Rotura de enlaces C-O y C-N.
400-600	Descomposición de materiales bituminosos. Se generan aceites y alquitranes.

600	Cracking de los materiales bituminosos. Generación de hidrocarburos gaseosos de cadena corta e hidrocarburos aromáticos
>600	Dimerización de las olefinas; reacción de etileno a ciclohexano; generación de compuestos aromáticos volátiles.

Nota. Se observa la capacidad de descomposición térmica según la temperatura del proceso. Fuente: Castells (2005).

Para la presente investigación, se escogió la pirólisis de carbonización lenta, ya que se adaptó mejor a la disponibilidad de recursos y a las cantidades a ser procesadas por lotes.

Teniendo en cuenta el interés por la obtención de combustibles no convencionales, el grupo de Investigación en Energías Alternativas IENA presentó el diseño y construcción de un reactor pirolítico a escala de laboratorio para poder realizar allí sus experimentaciones con este residuo, el cual se enfocó en su desarrollo y puesta en marcha del equipo. Para esto se diseñó y construyó un modelo piloto, dimensionado de acuerdo con las consideraciones establecidas en la literatura, aprovechando y reciclando materiales, junto con accesorios de otras máquinas previamente descartadas.

Este material se puede tratar mediante la aplicación de un proceso como la pirolisis, que contribuya a transformar este desecho en productos de valor agregado, dentro del marco de aplicación del modelo de economía circular.

Construcción del reactor pirolítico

Es importante conocer su principio de funcionamiento con apoyo de la Figura 1, donde la materia prima se inserta en el reactor pirolítico (1) que, a medida que incrementa su temperatura hasta el punto de la degradación térmica del material, comienza a liberar sus fracciones por la salida (2), donde fluye la corriente de gas de pirólisis hacia el condensador (5), que le reduce la temperatura mediante un flujo de agua, liberándola hacia el sistema de adición de calor (3), permitiendo que la fracción que logra condensarse se decante por la parte inferior del condensador, mientras la fracción de gas liviano, continúa su salida para la regeneración del proceso para producir calor en el reactor (Klug et al., 2013).

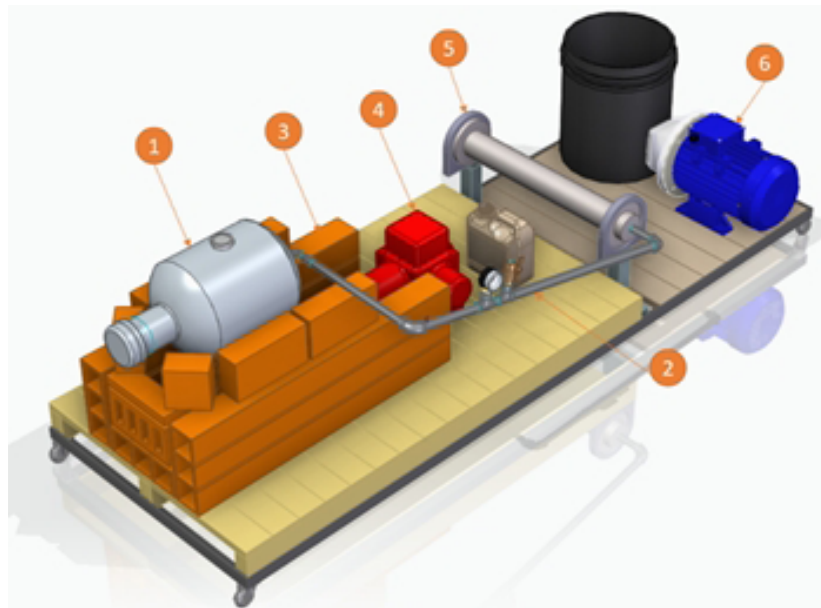
En el diseño del reactor piloto se priorizó el uso de materiales reutilizables y reciclados, cumpliendo así con el enfoque de economía circular dado al inicio del proyecto. Justificando lo anterior, los materiales que se dispone para el diseño del reactor son materiales que se encuentran como desecho de las obras efectuadas en la adecuación de la Universidad de América, como chatarra, mampostería, madera y equipos en desuso, entre otros. Los sistemas que componen este reactor pirolítico son:

- Sistema de transferencia de calor; se compone del recipiente reactor, quemador y hogar de combustión externa
- Sistema de condensación: conformado por el intercambiador de calor para condensación de gases y la bomba de agua
- Estructura o bastidor: se compone de vigas de soporte, tablas de madera y rodachinas.

Los sistemas de funcionamiento del reactor de pirolisis fueron ensamblados bajo el esquema de la Figura 1. 1) Reactor de pirolisis; 2) Sistema de escape de gases; 3) Sistema de conservación de calor-hogar; 4) Quemador de diésel; 5) Intercambiador de calor y, 6) Sistema de circulación y enfriamiento de agua (Camargo-Ojeda, 2023; Rodríguez López & Tunjacipa Martínez, 2023)

Figura 1

Esquema de reactor pirolítico con sus sistemas



Nota. Se diseñó y construyó el pirolizador con materiales descartados y reciclados. En Rodríguez Tunjacipa (2023).

Resultados de los ensayos de pirólisis

Se hicieron pruebas mediante las cuales se obtuvieron resultados muy similares en cuanto a la obtención de subproductos de NFU pirolizados. La primera prueba arrojó los valores que se aprecian en la Tabla 3, donde se muestra el tiempo transcurrido, la temperatura del interior del contenedor-reactor y la cantidad de crudo condensado obtenido. Se controló la toma del tiempo cada cinco minutos.

Tabla 3

Resultados obtenidos de la primera prueba

Tiempo transcurrido [min]	Temperatura reactor [°C]	Nivel condensado [ml]
0	22	0
5	210	0
10	280	35
15	370	75
20	395	120
25	415	155
30	420	180
35	418	205
40	400	220
45	410	260

La Tabla 4 muestra los parámetros finales obtenidos de la primera prueba concluida.

Tabla 4

Parámetros finales obtenidos de la primera prueba concluida

Parámetros finales	Valor
Producto sólido, negro de humo [gr]	459.10
Aceite de pirólisis [ml] (<i>Black oil</i>)	260
Fracción gas de pirólisis, [% volumen]	30,82
Fracción negro de humo [% volumen]	42,35
Fracción aceite de pirólisis [% volumen]	21,83
Fugas, pérdidas [% volumen]	5
Tiempo total de la prueba [min]	45
Consumo de diésel [L]	2,3

En la segunda prueba se utilizaron 1891.9 g de NFU cortados. Luego, se realizaron lecturas de la temperatura interna del reactor cada cinco minutos, junto con la lectura del volumen de condensado. La Tabla 5 permite apreciar los resultados.

Tabla 5

Resultados obtenidos en la segunda prueba concluida

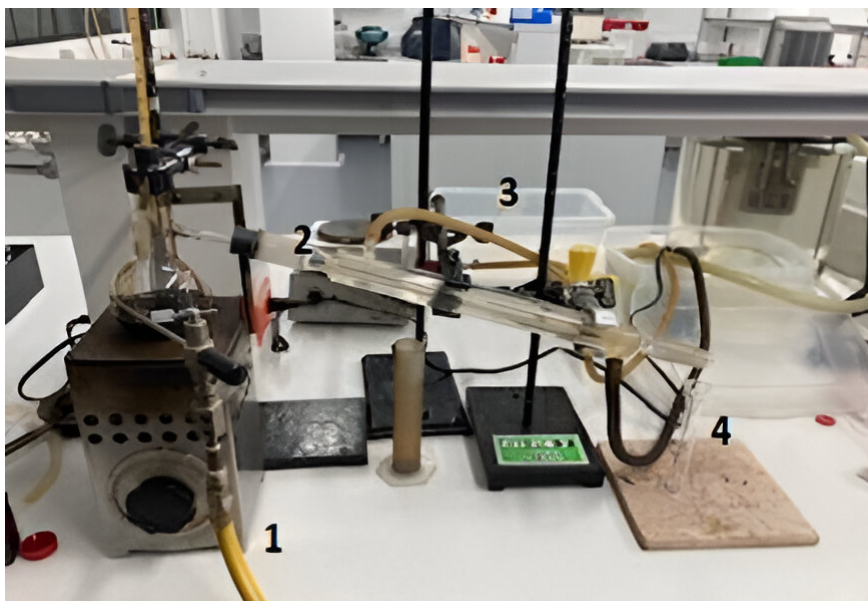
Tiempo [min]	Temperatura reactor[°C]	Temperatura entrada condensador [°C]	Temperatura salida condensador [°C]	Temperatura refrigerante [°C]	Nivel black-oil condensado [ml]
0	0	0	0	15	0
5	280	42	28	19	30
10	310	58	35	23	95
15	395	195	27	28	190
20	360	138	23	24	285
25	400	194	27	29	370
30	400	186	25	32	520
35	400	86	25	32	590
40	380	64	23	33	610
45	390	53	29	34	615
50	400	52	35	34	620

Refinado del crudo obtenido

Después de realizar el proceso de pirólisis del material de NFU, se recolectó una muestra de 100 ml de *black oil*, un aceite viscoso de olor fuerte similar al material de la llanta. Se procedió a realizar un proceso de refinación a escala de laboratorio, como muestra la Figura 2, para elaborar su respectiva curva de destilación, tomando muestras cada 5 ml y, midiendo la temperatura de salida del vapor. La Tabla 7 permite apreciar los resultados.

Figura 2

Montaje para obtención de la curva de destilación del black oil



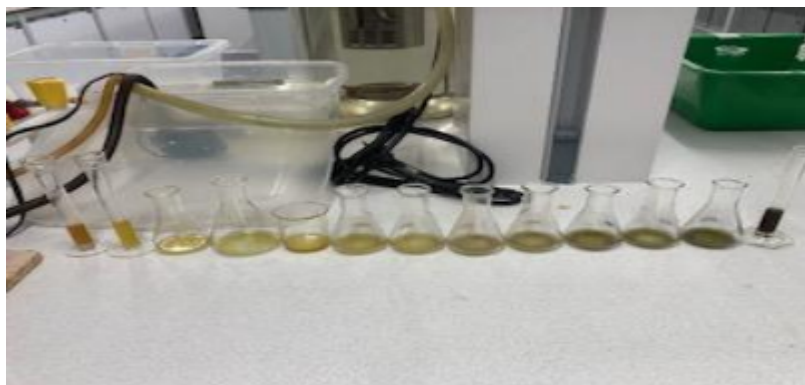
Nota. Montaje para refinar el *black oil* obtenido a diferentes temperaturas. Se utilizó 1- calentador de resistencia eléctrica, 2- destilador de vidrio, 3-agua de enfriamiento con bomba sumergible, 4-vaso de precipitados.

Se sometió la muestra a un proceso de adición de calor en el cual la temperatura se fue incrementando gradualmente hasta los 232 °C en la resistencia eléctrica y, se recolectaron las muestras que se iban obteniendo. En la Figura 3 se observan las diferentes fracciones obtenidas, notándose que, de derecha a izquierda, van las más pesadas, las intermedias y las más livianas.

El color de cada una de ellas muestra la pureza del refinado a medida que va incrementándose la temperatura. El color oscuro corresponde a las menos refinadas, mientras que las más refinadas presentan una coloración más clara.

Figura 3

Fracciones recolectadas de la destilación



Nota. Se obtuvieron diferentes fracciones del *black oil* conseguido a nivel de laboratorio.

Los resultados de esta refinación se observan en la curva de destilación de la Figura 4. En este caso, se registraron las temperaturas alcanzadas en el interior de la unidad de destilación y el volumen de líquido refinado.

Figura 4

Curva de destilación de *black oil* de pirólisis de NFU



Nota. Se observa que la mayor cantidad de líquido refinado se obtuvo calentando la muestra a 260 °C.

Resultados

A continuación, se presenta el análisis de resultados obtenidos en las diferentes fases de este proyecto.

Construcción del pirolizador

El pirolizador o reactor pirolítico se diseñó y construyó con materiales descartados y reciclados como maderas, varillas, ángulos, recipientes, mangueras, entre otros. El único componente nuevo que se adquirió fue la bomba de agua de enfriamiento para condensar el gas de pirólisis. La construcción del dispositivo permitió alcanzar temperaturas de pirólisis de hasta 400 °C, donde tendía a estabilizarse en el interior del recipiente reactor. Para alcanzar esta temperatura y por disponibilidad de recursos, se utilizó un quemador de diésel que fue recuperado de una caldera descartada.

La estructura construida para soportar todos los componentes evidenció buena resistencia mecánica, lo cual demostró que los cálculos estructurales cumplieron con los parámetros requeridos. Las uniones soldadas y atornilladas del equipo también mostraron buen comportamiento mecánico. El sistema que demanda ser mejorado para evitar afectarse con el calor producido es el del hogar del reactor del pirolizador. En este caso, se emplearon ladrillos comunes, que no resisten las altas temperaturas.

Se pudo recuperar el gas de pirólisis para obtener el crudo *black oil* mediante su condensación en un intercambiador de calor – condensador. El gas que no se condensó, se inyectó en el hogar de combustión externa como fuente adicional de energía.

Realización de las pruebas de pirólisis de los NFU

Se evidenció que este residuo se puede descomponer fácilmente mediante estos procesos de adición de calor externo. Se debe mejorar el sistema de concentración del calor para obtener en un tiempo más corto estos subproductos y utilizar menos energía de entrada. Se recomienda utilizar ladrillos refractarios para este sistema del pirolizador.

Con el material procesado en la segunda prueba, se obtuvo una cantidad significativa de *black oil* para su refinación, pero no compensa la energía utilizada con la combustión del diésel. Para obtener cantidades mayores de *black oil* se requerirá no solo un equipo de mayor tamaño, sino mayores cantidades de energía de entrada.

Refinación del *black oil* obtenido

Los destilados obtenidos entre 0 a 200 °C son considerados livianos. La fracción que corresponde a este rango es el 30 % del volumen y se asemeja a gasolina. El rango obtenido entre 200 a 260 °C se asumió como un destilado medio que corresponde a 35 %, mientras que la fracción restante se aproxima a residuos pesados con una fracción de 35 % que se formó, como gomas adheridas a las paredes del balón de calentamiento.

Se efectuó la combustión de una mezcla de las fracciones pesadas, que se podría utilizar como combustible para calderas y, con base en el análisis de gases de combustión, se aproxima a un diésel comercial. Se puede afirmar que el destilado funciona como mezcla con diésel para reutilizar el producto como combustible de caldera.

En algunas fracciones se observa un comportamiento muy viscoso tipo goma, pero no es un impedimento porque, al mezclar con combustible se vuelve a fundir. La formación de estas gomas hace que no sea adecuado para motores de combustión interna.

Se realizó una medición con una muestra de combustible mezclado de todas las fracciones encontradas, quemándolo en un recipiente metálico y midiendo las muestras de los gases mediante un embudo conectado a un medidor de gases automotriz (Figura 5). Se observó una combustión incompleta con humo negro y monóxido de carbono que saturó la máquina, por lo que se requiere efectuar un análisis por cromatografía de gases con el fin de caracterizar el combustible con concentraciones de carbonos del C6 al C12 y, de esta manera, tener una mejor comparación de resultados que lleven a conclusiones más acertadas. También es recomendable hacer una prueba de poder calorífico para comparar con el diésel comercial y otros combustibles disponibles.

Figura 5

Combustión de mezcla de las fracciones obtenidas



Nota. Todas las fracciones obtenidas fueron mezcladas en un recipiente metálico y encendidas, produciendo una llama simple.

Conclusiones

La pirólisis de NFU representa una óptima alternativa para reintegrar a la cadena productiva estos desechos, contribuyendo a la reducción de los volúmenes que quedan a cielo abierto y que facilitan la proliferación de plagas o, que son incinerados y liberan gases tóxicos a la atmósfera. Este reintegro a la cadena productiva permite obtener materias primas para combustibles y material sólido en forma de carbón que sirve como base para elaborar otros productos.

La selección y aprovechamiento de materiales reciclados facilitó el diseño y construcción de un reactor pirolítico o pirolizador adecuado para muestras de laboratorio. Se obtuvieron cantidades representativas de líquido crudo y carbón que pueden llevarse a escalas mayores, produciendo cantidades para aplicaciones industriales. El gas de pirolisis no condensado se pudo utilizar como fuente adicional de calor en el hogar del reactor.

Si bien las pruebas realizadas con diésel contribuyeron a obtener buenos rendimientos en los procesos, a futuro se busca utilizar combustibles que liberen menores emisiones, como el gas licuado del petróleo GLP, el gas natural u otros tipos como los biomásicos.

El crudo obtenido de la descomposición térmica de NFU es un producto con un alto grado de impurezas, que demandaría la incorporación de sistemas de refinado con altos rendimientos y capacidades. Basados en esta investigación, no se recomienda su uso directo en motores de combustión interna, debido al alto grado de impurezas.

El dispositivo construido se adaptará para aplicar procesos de pirólisis a residuos plásticos con los cuales se espera obtener subproductos más limpios que puedan ser utilizados en motores de combustión interna; con esto se busca contribuir a la mitigación de la problemática de los plásticos en el ambiente.

Referencias

- Awolusi, T. F., Oke, O. L., Akinkulore, O. O., & Sojobi, A. O. (2019). Application of response surface methodology: Predicting and optimizing the properties of concrete containing steel fibre extracted from waste tires with limestone powder as filler. *Case Studies in Construction Materials*, 10, e00212. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00212>
- Berendsohn, R. (2018). Our waste tire problem is getting worse. <https://www.popularmechanics.com/cars/car-technology/a22553570/waste-tires/>
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). Guía para el manejo de llantas usadas. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/items/9ba8833a-65a3-4820-bb94-17aca233f5e5>
- Camargo-Ojeda, S. (2023). *Adaptación de un sistema de enfriamiento para la condensación de gas de pirólisis de llantas usadas a nivel de laboratorio*. Fundación Universidad de América.
- Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Frikha, K., Limousy, L., Pons-Claret, J., Vaultot, C., Pérez, K. F., Garcia, B. C., & Bennici, S. (2022). Potential valorization of waste tires as activated carbon-based adsorbent for organic contaminants removal. *Materials*, 15(3), 1099. <https://doi.org/10.3390/ma15031099>
- Klug, M., Gamboa, N., & Lorber, K. (2013). Sustainable development and renewable energy from biomass in Peru - Overview of the current situation and research with a bench scale pyrolysis reactor to use organic waste for energy production. *Journal of Sustainable Development*, 6(8). <https://doi.org/10.5539/jsd.v6n8p130>
- Mmereki, D., Machola, B., & Mokokwe, K. (2019). Status of waste tires and management practice in Botswana. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 69(10), 1230-1246. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1279696>
- Revista Semana. (2021, 16 de abril). En Colombia, cada año 950.000 llantas usadas van a parar a la basura. <https://www.semana.com/economia/inversionistas/articulo/en-colombia-cada-ano-950000-llantas-usadas-van-a-parar-a-la-basura/202129/>

- Rodríguez, J. A. y Tunjacipa, M. M. (2023). *Diseño y construcción de un reactor piloto de pirólisis de neumáticos usados* [Tesis de Pregrado, Fundación Universidad de América]. Repositorio Institucional Lumieres. <https://hdl.handle.net/20.500.11839/9167>
- Rogachuk, B. E. & Okolie, J. A. (2023). Waste tires based biorefinery for biofuels and value-added materials production. *Chemical Engineering Journal Advances*, 14, 100476. <https://doi.org/10.1016/j.ceja.2023.100476>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (s.f.). Temas Ambientales. Llantas usadas. <https://www.ambientebogota.gov.co/llantas-usadas>
- Thomas, B. S., Gupta, R. C., Kalla, P., & Cseteneyi, L. (2014). *Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates*. *Construction and building materials*, 59(1), 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.074>
- World Health Organization. (2019). *Compendium of WHO malaria guidance: prevention, diagnosis, treatment, surveillance and elimination*. World Health Organization.

Capítulo 8.

Monitoreo para cultivos hidropónicos aplicando IoT y Visión Artificial mediante uso de energía solar

Ana Sofía Muñoz Villota

Ivette Camila Yepez Moran

Alejandro Díaz Iguá

David Eraso García

Edna Margarita Moncayo Torres

Tito Manuel Piamba Mamián

Cítese como: Muñoz-Villota, A. S., Yepez-Moran, I. C., Díaz-Iguá, A., Eraso-García, D., Moncayo-Torres, E. M. y Piamba-Mamián, T. M. (2024). Monitoreo para cultivos hidropónicos aplicando IoT y Visión Artificial mediante uso de energía solar. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 112-138). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c426>

Resumen

La implementación de un sistema de monitoreo destinado a un cultivo hidropónico en el municipio de Contadero permite hacer uso de diversos sensores para medir variables relevantes del cultivo, entre ellas, la conductividad, el nivel de agua, el pH y la temperatura tanto del agua como del ambiente. Durante el proceso se instaló una cámara para hacer seguimiento del cultivo, que permitió extender el proyecto hacia la visión artificial.

Esta implementación hizo posible reducir en gran medida el tiempo que se dedicó al plantío. Se realizó el seguimiento para constatar que esta actividad requería pasar una gran parte del día para hacer las mediciones; con la implementación de los sensores las variables fueron monitoreadas con más eficiencia y eficacia. Además, la investigación buscó avanzar en términos de energía solar, con la instalación a futuro de paneles solares en una de las unidades del cultivo.

Los datos óptimos obtenidos por los sensores consistieron en: una temperatura de entre 18 °C y 29 °C, una humedad relativa en un rango de 40 a 45 %, un valor de pH de entre 5.5 y 6.5 y una conductividad eléctrica de entre 1 y 2 dS/m.

Palabras clave: cultivos hidropónicos; automatización; monitoreo; visión artificial; IoT; panel solar

Introducción

La agricultura es fundamental en la seguridad alimentaria, en la generación de empleo y, contribuye significativamente en la economía de Colombia. Lastimosamente, se enfrenta a muchos factores ambientales como el cambio climático, la escasez de agua, la disminución de fertilidad del suelo, entre otros. Para superar estas condiciones, se puede recurrir al uso de nuevos métodos agrícolas como los cultivos hidropónicos, que lleven a encontrar soluciones innovadoras para una agricultura más sostenible y eficaz que disminuya costos en producción y mejore la calidad de los productos, en este caso, las hortalizas en el Contadero, Nariño para, posteriormente, ser acogida a lo largo del territorio colombiano.

Para la implementación del sistema de monitoreo de variables en cultivos hidropónicos de lechuga por IoT y visión artificial, se ha tenido en cuenta las instalaciones ubicadas en la vereda San Francisco del municipio del Contadero, uno de los pocos lugares en Nariño que están innovando en este tipo de cultivos. Desde el grupo de investigación del programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Mariana, se aborda objetivamente algunos de los desafíos que enfrenta la agricultura de la región nariñense, como: la contaminación de las lechugas sembradas en tierra ya que, gracias a su contacto con el suelo, los consumidores pueden estar expuestos a infecciones con parásitos intestinales, según el estudio de Polo et al. (2016), quienes tomaron muestras en 21 predios dedicados a cultivar exclusivamente lechuga en el municipio de Pasto, encontrando como resultado, una contaminación con huevos y larvas de parásitos en 100 % de las muestras: 95,25 % con quistes de *Entamoeba* spp.; 71,43% con ooquistes de *Isoospora* spp.; 61,90% con larvas (L3) de *Strongyloides stercoralis*; 28,57 % con huevos de *Toxocara* spp., y 4,76 % con ooquistes de *Eimeria* spp.

La hidroponía emerge como una solución efectiva a esta problemática; al ser un cultivo que se realiza en agua y se mantiene alejado del suelo, la hidroponía no solo elimina los riesgos de contaminación, sino que aborda algunas de las dificultades inherentes al sistema. Una de las dificultades identificadas en los cultivos hidropónicos reside en la necesidad de realizar mediciones frecuentes a lo largo del día. Este desafío se ve agravado por la estructura en forma de torre del sistema, que requiere mediciones en las cuales la persona responsable debe inclinarse durante un periodo considerable.

Esta situación plantea legítimas preocupaciones con relación a la salud de la persona encargada del cultivo, dado que la ejecución de movimientos repetitivos, el mantenimiento de posturas forzadas y la manipulación manual de cargas, afectan principalmente a la espalda, el cuello, los hombros y las extremidades, llegando a causar problemas de salud que van desde dolores y molestias menores hasta enfermedades más graves que requieren atención médica. En casos crónicos, estos trastornos pueden provocar discapacidad e impedir que la persona trabaje. Existen múltiples tareas en las que los trabajadores pueden verse expuestos a dichos factores (Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, s.f.).

Por último, la automatización implica la utilización de tecnología para llevar a cabo acciones mediante sistemas informáticos, mecánicos o electromecánicos, que funcione con una intervención humana mínima; esto produce renuencia en el agricultor, ya que no presenta una actitud participativa a la hora de efectuar el monitoreo de sus cultivos con cualquier dispositivo tecnológico. Para poder ejecutar un proyecto investigativo que aborde los problemas mencionados, se debe realizar ciertos pasos: investigar y focalizar la zona de trabajo para poder identificar la población de la cual se extrae los conocimientos empíricos adquiridos a través de varias generaciones por el agricultor; ya habiendo identificado la base de estudio, se procede a la adquisición de los primeros implementos para hacer el primer prototipo de monitoreo; una vez obtenidos los datos adquiridos por los sensores, se procede a realizar la respectiva evaluación y organización, con el objetivo de minimizar la aparición de errores para, finalmente, comparar los mismos con un cultivo hidropónico convencional.

La creciente facilidad de acceso a internet en el territorio colombiano abre muchas posibilidades a la hora de desarrollar proyectos de investigación; una muestra clara de esto es el uso de IoT para la organización de datos. Es por eso que, trabajar con IoT en la agricultura se considera la solución ideal, ya que en ese ámbito existe una necesidad de monitorización y un control continuo. La agricultura de precisión tiene como fin, proporcionar un sistema de apoyo a la toma de decisiones, que ayude a los agricultores a implementar prácticas agrícolas eficientes, con el propósito de aumentar la rentabilidad, reducir los riesgos ambientales y preservar los recursos naturales.

El presente trabajo de investigación da a conocer los procesos por los cuales se logró obtener resultados, con la expectativa de seguir realizando un desarrollo investigativo que logre cumplir con el propósito postulado en este proyecto.

Marco teórico

Cultivos hidropónicos

La hidroponía se deriva del griego 'hidro' (agua) y 'ponos' (labor o trabajo), que significa trabajo en agua. En la actualidad se usa para referirse a un método de cultivo sin tierra. En este sistema, las plantas se desarrollan gracias a un suministro preciso de agua y nutrientes mediante una solución nutritiva. Este enfoque presenta múltiples beneficios, como cosechas libres de plagas y contaminantes, reducción de costos, independencia de factores climáticos, además de mayor eficiencia en el uso de agua y espacio. Según Beltrano y Giménez (2015), a pesar de que la práctica de la hidroponía demanda una significativa inversión inicial y la necesidad de adquirir un conocimiento profundo en la materia, la información necesaria resulta accesible para cualquier persona. De esta manera, se abre la posibilidad de que cualquier individuo incurriera en ella y aproveche sus beneficios.

Sin embargo, es crucial tener en cuenta ciertas desventajas de estos cultivos sin suelo, ya que, aunque eliminan el riesgo de la contaminación y la competencia con malezas, se plantea como un desafío significativo, la rápida propagación de enfermedades en estos sistemas. A pesar de estos inconvenientes, la hidroponía ofrece una alternativa eficiente y limpia para la producción de cultivos y, la adopción de este método puede resultar beneficiosa a largo plazo.

Internet of Things (IoT)

El IoT implica el reconocimiento de objetos inteligentes y el mantenimiento de una comunicación entre ellos. En la práctica, esto significa que los dispositivos se expanden en una red de comunicación, donde sensores y actuadores se integran con el entorno, compartiendo información para construir una Imagen Operativa Común (Gubbi et al., 2013).

Para que el IoT tenga éxito, es esencial ir más allá de la informática móvil tradicional, razón por la cual, la conectividad inteligente y la computación contextual se vuelven fundamentales. El IoT se compone de tres elementos clave: en primer lugar, el hardware, que incluye sensores, actuadores y hardware de comunicación. Luego, el middleware, que abarca herramientas para el análisis de datos. Finalmente, la presentación, que implica herramientas de visualización accesibles en varias plataformas (Gubbi et al., 2013).

Aunque el IoT promete un futuro emocionante, no está exento de desafíos tales como la implementación del protocolo de Internet versión 6 o IPv6, la eficiencia energética en sensores y, la necesidad de estándares consensuados para la interoperabilidad (Evans, 2011, como se cita en Pérez, 2017); sin embargo, como nos permite la conexión de dispositivos cotidianos a Internet para enviar y recibir datos, es un gran paso hacia la automatización, lo cual la hace una gran herramienta.

Monitoreo y visión artificial

La visión artificial, también conocida como visión por computadora, busca emular la capacidad de algunos seres vivos para ver una imagen, comprenderla y actuar en consecuencia.

Según García y Caranqui (2015), el constante desarrollo de nuevos algoritmos y aplicaciones ha convertido a esta disciplina en una tecnología en evolución rápida, como demuestran numerosas investigaciones y publicaciones en la comunidad científica. Este progreso se atribuye a la gran cantidad de contenido visual generado hoy en día, junto con la capacidad de procesamiento y almacenamiento de dispositivos electrónicos y, la disponibilidad de herramientas, librerías y lenguajes de programación.

Las técnicas de visión artificial encuentran aplicaciones exitosas en diversas áreas como biología, medicina, seguridad, industria, robótica, entre otras. La visión artificial, al automatizar el proceso de percepción visual mediante el tratamiento de imágenes digitales, se convierte en una herramienta fundamental para mejorar la eficiencia y precisión en estos campos. Esta disciplina compleja se entrelaza con otras áreas y promete un futuro alentador en la automatización de procesos en diversas áreas.

Energía renovable

En nuestro planeta, los recursos de energía renovable son cuantiosamente abundantes. Para ilustrar esto, Estrada (2013) sostiene que, basta considerar que la energía solar recibida cada diez días en la Tierra equivale a todas las reservas conocidas de petróleo, carbón y gas. Este ejemplo resalta la vasta disponibilidad de fuentes de energía renovable, como la solar y eólica.

En contraste, la generación, el transporte y el consumo de energías convencionales tienen un impacto ambiental significativo, siendo responsables de problemas como el cambio climático y la lluvia ácida. Aunque las energías renovables no están exentas de efectos, estos son considerablemente menores y siempre reversibles, marcando una diferencia en términos de sostenibilidad.

Un aspecto fundamental de la energía renovable, como la solar y eólica, es su carácter inagotable. Al utilizar la radiación solar y el viento para la producción de calor o electricidad, no se reduce en absoluto la cantidad de energía que el sol envía a la Tierra o la energía cinética del viento. Este enfoque resalta la capacidad ilimitada y sostenible de las fuentes de energía renovable.

Metodología

Descripción de la zona

Para dar inicio al proyecto, se llevó a cabo una investigación preliminar sobre esta modalidad de cultivos, después de una recopilación de información, en reuniones con la dueña y encargada del cultivo, para discutir los aspectos fundamentales del proceso.

Como resultado, se adquirió conocimiento acerca del territorio de la vereda San Francisco, Contadero, Nariño, lugar en el cual se ubica el cultivo hidropónico con el que se trabaja este proyecto. Este lugar se encuentra situado a altitudes que fluctúan entre 1.973 y 3.406 metros sobre el nivel del mar, con una temperatura promedio oscilante entre 8 °C y 22 °C. Gracias a estas condiciones iniciales, es adecuado decir que la siembra de lechugas en esta zona es apropiada. Además, en el caso de los cultivos hidropónicos, sus condiciones de cultivo tienen otras especificaciones: espacio con el que se cuenta, tipo de terreno, tipo de lechuga, entre otras. En el cultivo de estudio se trabaja dentro del invernadero a una temperatura mayor que la temperatura externa, con dos variedades de lechugas: la variedad en verde ‘Gotham’, caracterizada por tener Manzana abierta tipo Batavia de presentación atractiva con follaje rizador; este tipo de lechuga se caracteriza por ser una planta equilibrada, con un buen relleno de corazón, pero no apretada en la madurez y, su salida es fácil de manejar, ya que tiene un buen peso. La variedad morada ‘Carmín’, se define por tener un color morado intenso desde la base hasta el borde de la hoja; tiene facilidad de comercialización por su calidad visual y alta uniformidad, ya que es una lechuga innovadora tipo gourmet.

Este cultivo de estudio está construido con un sistema de técnica de película nutriente (NFT, por sus siglas en inglés), obteniendo una producción de 1200 lechugas por mes. Las instalaciones de este sistema incluyen tres unidades, cada una equipada con dos torres de cultivo que tienen la capacidad de albergar 600 lechugas, cada una de dos metros de altura, provistas de 20 tubos de PVC de tres pulgadas. Para el cultivo se adquiere plántulas previamente germinadas para colocarlas en los orificios de los tubos, que tienen un diámetro de 5 cm y están protegidos por canastillas o espuma para evitar que las lechugas caigan dentro de ellos.

Ya revisadas las condiciones, el objetivo principal de este proyecto fue proporcionar a la encargada una herramienta eficiente y accesible para monitorizar las condiciones del cultivo. Con esto en mente, por medio de programación se consiguió visualizar directamente las mediciones desde un dispositivo móvil a través de una plataforma de IoT; este enfoque facilita un monitoreo en tiempo real, brindando un control más efectivo sobre las condiciones del cultivo.

Componentes

En el transcurso de la investigación se obtuvo información esencial que permite llevar a cabo una selección de sensores destinados a medir las variables fundamentales para el éxito del cultivo. Al tomar en cuenta este primer estudio, se denota los siguientes componentes electrónicos adecuados para un primer prototipo de monitoreo y sus aplicaciones dentro del cultivo de estudio:

- El controlador encargado de la programación y supervisión de los demás componentes es el ESP32, un microprocesador que integra Wi-Fi y Bluetooth en un solo chip. Este dispositivo se ha elegido por su versatilidad, eficiencia y potencia, lo que lo convierte en una opción idónea para una amplia variedad de aplicaciones. Su elección se basó en consideraciones específicas, como la estabilidad y adecuada conexión Wi-Fi en el lugar del cultivo; además, destaca por su capacidad para interactuar sin complicaciones con la plataforma de Blynk, lo que facilita la integración y el monitoreo del sistema.

Figura 1

ESP32



- Para medir el nivel de agua en el tanque y los tubos del cultivo se empleó sensores de nivel vertical, que son dispositivos electromecánicos que detectan el nivel de un líquido; están compuestos por un interruptor y un flotador magnético que funciona como un conmutador en función del nivel del fluido. En el primer prototipo se utilizó sensores de nivel normalmente abiertos en la torre de cultivo y se ubicó tres de ellos en los tubos; cuando el nivel de agua es correcto, permanecen activados; si desciende, se enciende un LED en la plataforma de Blynk. El sensor del tanque de agua opera de manera similar, indicando cualquier disminución en el nivel mediante la activación de una señal visual en la interfaz de Blynk.

La importancia de medir de manera precisa los niveles de agua tanto en los tubos como en el tanque radica en la vital dependencia del agua de los cultivos

hidropónicos. Una disminución en el nivel de agua puede ser indicativo de diversos problemas, tales como posibles fugas, obstrucciones en algún punto del sistema o, incluso, dificultades en la red de suministro de agua. Dada la naturaleza crítica del agua para el éxito de los cultivos hidropónicos, monitorear constantemente estos niveles no solo permite mantener las condiciones ideales para el crecimiento de las plantas, sino, prevenir y abordar eficientemente cualquier anomalía que pueda surgir en el sistema.

Figura 2

Sensor de nivel de líquido con flotador vertical p52 (0-110v) baja presión



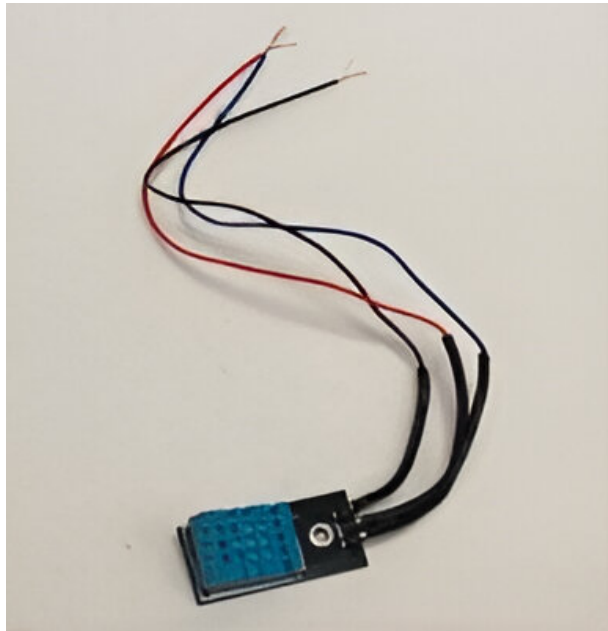
Nota. Vistrónica SAS (2020a).

El sensor DHT11 mide tanto la temperatura como la humedad relativa; la humedad, abarca un rango del 20 % al 80 % con una precisión del 5 %; para la temperatura, su capacidad de medición se extiende desde 0 °C hasta 50 °C con una precisión de ± 2 °C. En el caso específico de la humedad relativa en un cultivo hidropónico, se establece un rango deseado entre el 30 % como mínimo y el 60 % como máximo, considerando que la temperatura ambiente no debe superar los 29 °C.

En el contexto de un cultivo hidropónico, la medición precisa de la temperatura y la humedad ambiental resulta decisiva para asegurar un crecimiento saludable de las plantas. Variaciones extremas en la temperatura pueden afectar la absorción de nutrientes y el metabolismo de las plantas. Además, mantener la humedad en niveles ideales, es esencial para prevenir problemas como el desarrollo de mohos, que podrían dañar las plantas y, para permitir una evaporación adecuada, lo cual facilita la absorción de nutrientes por las raíces.

Figura 3

Sensor DHT11



Nota. Vistrónica SAS (2020b).

- El sensor de pH tiene la capacidad de medir valores en un rango de 0 a 14 pH con una precisión aproximada de ± 0.1 pH. Este dispositivo muestra versatilidad al operar en un rango de temperatura específico, permitiendo mediciones entre 0 °C y 60 °C, y destaca por un rápido tiempo de respuesta de más o menos un minuto.

En el contexto de la hidroponía, la importancia del pH se manifiesta en varios aspectos: el pH influye directamente en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, siendo esencial para asegurar que los nutrientes necesarios estén fácilmente solubles en el agua y puedan ser absorbidos por las raíces. En sistemas hidropónicos, el rango ideal de pH se sitúa entre 5.5 y 5.8, donde la mayoría de los nutrientes esenciales mantiene su solubilidad óptima.

Además, los efectos de valores extremos de pH son notables. Un pH demasiado alto (7 o más) puede hacer que los micronutrientes sean inaccesibles, afectando negativamente el desarrollo de las plantas. Por otro lado, un pH demasiado bajo (menor a 4) puede causar la muerte de las raíces, comprometiendo la salud y el crecimiento general de las plantas.

Figura 4

Sensor de pH analógico para Arduino



Nota. Vistrónica SAS (2020c).

- El sensor de conductividad eléctrica (CE), compuesto por electrodos sumergidos y un circuito eléctrico, es esencial para evaluar la capacidad de una solución para conducir electricidad. Su funcionamiento implica la generación de un campo eléctrico en la solución al aplicar tensión entre los electrodos. La medición de la resistencia eléctrica entre los electrodos permite determinar la conductividad de la solución. La importancia del sensor radica en su capacidad para precisar la cantidad de fertilizantes disueltos en el agua.

Un sensor de CE es un dispositivo fundamental utilizado para evaluar la capacidad de un líquido o solución para conducir electricidad. Este dispositivo consta principalmente de dos componentes esenciales: electrodos sumergidos en la solución a medir y un circuito eléctrico que permite evaluar la corriente resultante.

En términos de funcionamiento, los electrodos, comúnmente fabricados con materiales conductores como acero inoxidable o platino, al aplicar una tensión eléctrica entre ellos, generan un campo eléctrico en la solución, que induce el movimiento de los iones presentes en la solución; la conductividad se efectúa midiendo la resistencia eléctrica entre los electrodos. En resumen, cuanto menor sea la resistencia, mayor será la conductividad de la solución.

La importancia del sensor de CE radica en su capacidad para determinar la cantidad de fertilizantes disueltos en el agua, con un rango óptimo recomendado entre 1.2 y 2.0 mS/cm (milisiemens por centímetro). El rango de medición de este sensor se sitúa entre 1 ms/cm y 20 ms/cm, con una temperatura de funcionamiento de 5 a 40 °C y una precisión del $\pm 10\%$ FS.

En el contexto específico de un cultivo hidropónico, medir la CE es primordial para garantizar el éxito del mismo; esta ofrece información valiosa sobre la disponibilidad de nutrientes en la solución. En hidroponía, su rango óptimo varía según el cultivo, pero generalmente se encuentra entre 1.0 y 2.5 dS/m. Valores más altos pueden indicar una concentración excesiva de sales, mientras que valores bajos pueden señalar deficiencias nutricionales. Además, la CE permite ajustar la concentración de nutrientes en la solución nutritiva, facilitando correcciones, como: diluir la solución en caso de una CE demasiado alta o agregar más nutrientes si es baja.

Figura 5

Sensor de conductividad eléctrica analógico para Arduino



Nota. Vistrónica SAS (2020d).

- El sensor de temperatura DS18B20 es un dispositivo diseñado para medir temperaturas en un rango amplio, desde -55 °C hasta 125 °C, generalmente sellado para resistir al agua; se vuelve perentorio en un entorno de cultivo hidropónico.

En este contexto, la medición exacta de la temperatura del agua es esencial para fomentar el crecimiento saludable de las plantas. La temperatura influye directamente en la absorción de nutrientes por las raíces, siendo ideal mantenerla entre 21 °C y 28 °C para garantizar un crecimiento eficiente. Desviaciones de este rango pueden afectar la metabolización de nutrientes y provocar problemas como estrés térmico, ralentización del crecimiento y dificultades en la absorción de nutrientes; además, la temperatura también incide en el desarrollo de patógenos.

Figura 6

Sensor de temperatura impermeable DFROBOT DS18B20 para Arduino



Nota. Vistrónica SAS (2020e).

- Con el objetivo de mejorar la supervisión del proceso, se integró una cámara en la unidad de cultivo más utilizada; este componente no solo facilita una vigilancia más detallada del crecimiento de las lechugas, sino que sienta las bases para la implementación de la visión artificial. La inclusión de esta tecnología avanzada tiene como meta, llevar el proyecto un paso más allá.

La cámara, en su función de recolección de información sobre el cultivo, desempeña un papel fundamental en la creación de una base de datos que, alimentada por la información recopilada, servirá como elemento clave para trabajar con la visión artificial. De este modo, se establece una conexión entre la observación detallada del crecimiento de las lechugas y la capacidad de la visión artificial para analizar y procesar datos, abriendo nuevas posibilidades para la toma de decisiones informadas en el cultivo hidropónico de lechugas con el que se está trabajando.

Figura 7

Cámara de Seguridad Ext Robótica IP Wifi Yoose Mini PTZ Full HD 1080p



Nota. Tecnocentry (s.f.).

Durante la fase de investigación se observó que los componentes mencionados son dispositivos comúnmente empleados en entornos educativos para propósitos didácticos. Esta característica es uno de los factores principales que limita la idoneidad del primer prototipo para un uso prolongado o permanente, ya que estos dispositivos no están diseñados para resistir el desgaste constante asociado con un entorno operativo continuo.

En el curso de esta investigación, fue básico tener en cuenta la necesidad de realizar cambios apropiados en estos componentes, considerando simultáneamente las variables previamente determinadas en el proceso investigativo. La atención a la selección de nuevos componentes fue esencial para garantizar una operación más duradera y sostenible, alineada con los requisitos y demandas específicas del entorno de cultivo hidropónico, como:

- Para mejorar el seguimiento y el control en el cultivo hidropónico, se optó por migrar del ESP32 a una Raspberry Pi, un microcomputador altamente versátil que ofrece una potencia de procesamiento considerable y una amplia gama de interfaces de entrada y salida, lo que facilita su integración con el resto del sistema hidropónico. Este cambio ayudó a agregar nuevas funciones para mejorar el sistema, haciéndolo más efectivo.

Figura 8

Raspberry Pi



Nota. Vistrónica SAS (2020f).

- Con el objetivo de perfeccionar el control de temperatura y humedad relativa, se realizó una transición del sensor DHT11 al DHT22, que ofrece una mayor exactitud y fiabilidad en la medición. En cuanto a la humedad relativa, cubre un rango del 0 % al 100 % con una precisión mejorada de 2 %, mientras que, para la temperatura, su capacidad de medición se extiende desde -40 °C hasta 80 °C con una precisión de 0,5 %, un cambio fundamental para asegurar un monitoreo más preciso y detallado, promoviendo condiciones óptimas para el crecimiento saludable de las plantas.

Figura 9

DHT22



Nota. Vistrónica S.A.S. (2020g).

- Para mejorar el control del pH, se escogió actualizar el sensor existente, a un sensor de pH de uso industrial, que está diseñado para resistir condiciones adversas como la hidrólisis y, puede eliminar el error alcalino básico dando un excelente rendimiento anticontaminación.

Figura 10

Sensor de pH de uso industrial

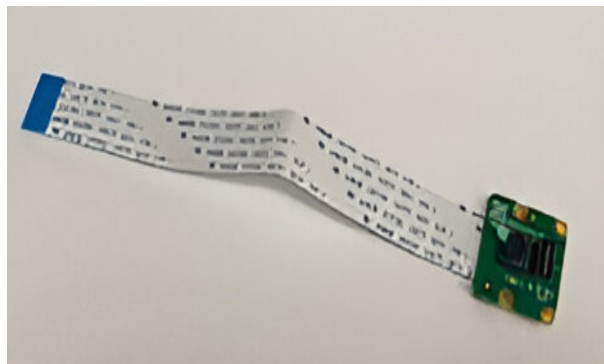


Nota. Vistrónica S.A.S. (2020h).

- Se integró una cámara Raspberry Pi V2 al sistema de cultivo hidropónico, con el propósito de monitorizar el crecimiento de las plantas y la detección de enfermedades.

Figura 11

Cámara Raspberry Pi V2



Implementación académica

A continuación, se presenta y describe algunas imágenes que detallan el proceso de creación del primer prototipo. Estas capturas ofrecen una perspectiva gráfica del desarrollo y las fases clave en la construcción de este prototipo, proporcionando una visión detallada para comprender mejor el trabajo y los componentes involucrados en el proceso de creación. Las Figuras 12 y 13, obtenidas a través de tomas realizadas por un dron, proporcionan una perspectiva visual detallada que permite observar con claridad las tres unidades de cultivo.

Figura 12

Unidades de cultivo vereda San Francisco, Contadero



Figura 13

Vista superior de las unidades de cultivo



Las Figuras 14 y 15 proporcionan una representación visual detallada de las torres de cultivo, estructuras especialmente diseñadas donde están ubicadas las lechugas para su cultivo en un sistema hidropónico. En la Figura 15, específicamente, se puede apreciar la disposición de las lechugas, con pocos días de haber sido sembradas en el cultivo.

Figura 14

Torre de cultivo



Figura 15

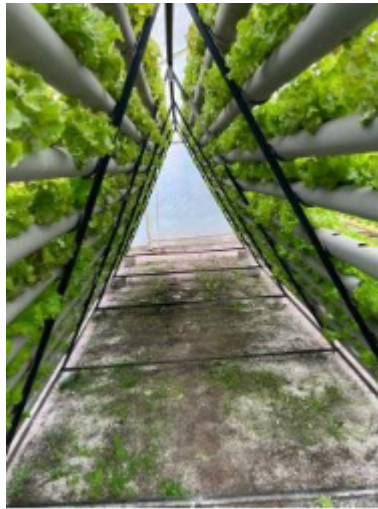
Torres de cultivo con siembra de lechugas



En la Figura 16 se ofrece la posibilidad de tener una visión desde la parte inferior de las torres de cultivo.

Figura 16

Torre de cultivo



En la Figura 17 se muestra un vistazo de lechugas con un periodo de crecimiento de 35 días. Esta imagen permite apreciar la robustez y salud que han alcanzado durante este periodo.

Figura 17

Lechugas con 35 días de crecimiento



En las Figuras 18 y 19 se puede observar el proceso de instalación del Prototipo 1 en una de las unidades de cultivo.

Figura 18

Instalación de prototipo 1



Figura 19

Instalación del primer prototipo



En cuanto a la programación, se realizó cuatro códigos: tres de ellos fueron en Python para el sensor de pH, sensores de nivel y CE; el cuarto código en Arduino, el cual se encarga de reunir los datos de los sensores y enviarlos a la plataforma de Blynk para poder hacer su respectivo análisis.

Implementación industrial

El objetivo del proyecto fue la implementación de energía solar en unidades de cultivo hidropónico de lechugas, buscando reducir costos y estandarizar precios.

Se optó por paneles solares monocristalinos monofaciales, debido a su eficiencia y capacidad para generar energía. La energía solar, al ser sostenible y libre de emisiones, es ideal para combatir el cambio climático.

La instalación se planificó considerando factores como la inclinación, orientación y pérdidas comunes en sistemas fotovoltaicos. La cantidad de paneles se determinó en función de la potencia de una bomba eléctrica de 1 HP, el principal consumidor del sistema. La elección de un sistema solar off-grid brinda flexibilidad y replicabilidad en diversas ubicaciones.

Se aprendió sobre la irradiación solar mediante la base de datos PVGIS y una visita al sitio para evaluar variables geográficas. Los cálculos revelan que, para una bomba de 750W, se necesitaría, al menos, dos paneles solares de alta potencia. La eficiencia del sistema y su continuidad son aseguradas mediante un sistema de almacenamiento de energía, como baterías.

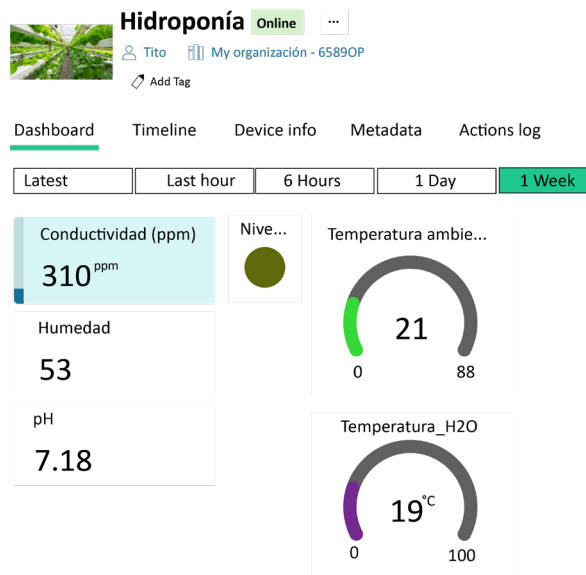
La inclusión de energías renovables, aunque no fue planeada inicialmente, enriqueció el proyecto al ofrecer beneficios económicos, sostenibilidad ambiental y oportunidades para la agricultura. Se espera que esta iniciativa inspire enfoques más innovadores y sostenibles en futuros proyectos agrícolas.

Resultados

Sensores

Figura 20

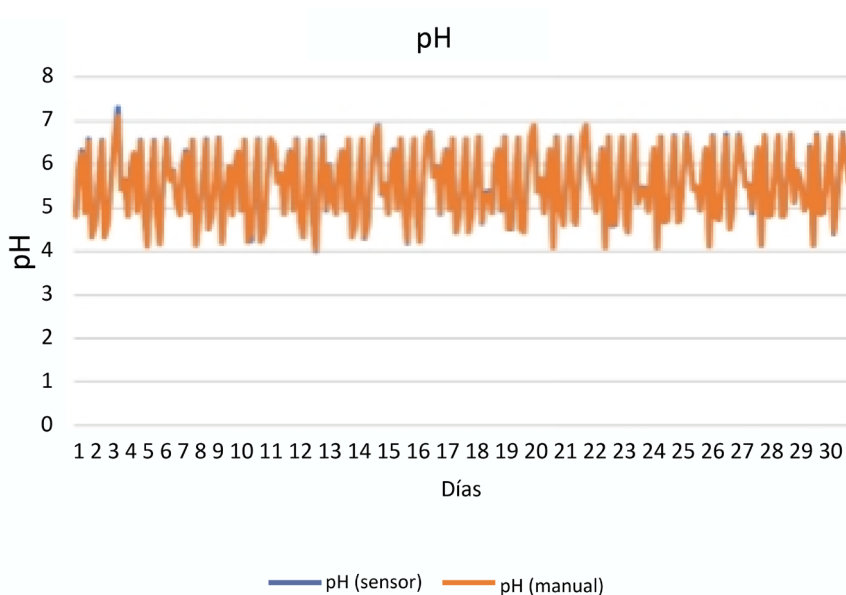
Visualización de las variables en Blynk



- Sensor pH

Figura 21

Gráfica pH



Nota. Cuastumal (2023).

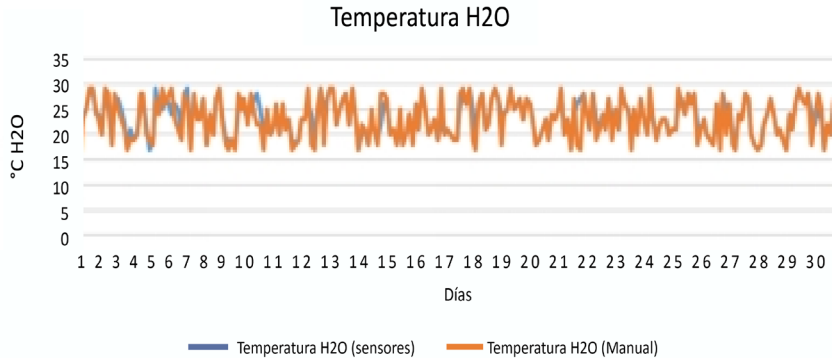
Con los datos obtenidos se pudo observar una media aritmética de 5,666 en valor de pH y una desviación total de 0,9631.

Al momento de analizar los niveles de pH, se pudo evidenciar que el sensor manual mostraba un margen de error mínimo en comparación con el sensor automatizado. Sin embargo, se pudo observar una variación significativa en el día 3, donde el pH superó el límite establecido para el cultivo. Ante esta observación, se tomó la medida de reducir el pH para evitar posibles daños a las hojas de las plantas. Al comparar el desempeño del sensor manual LIUIC Digital pH Meter y el monitor pH-4502C, se notó un margen de error mínimo. Esto resulta en una evidencia clara de por qué se debe calibrar adecuadamente los sensores manuales.

- Temperatura del agua

Figura 22

Gráfica temperatura del agua



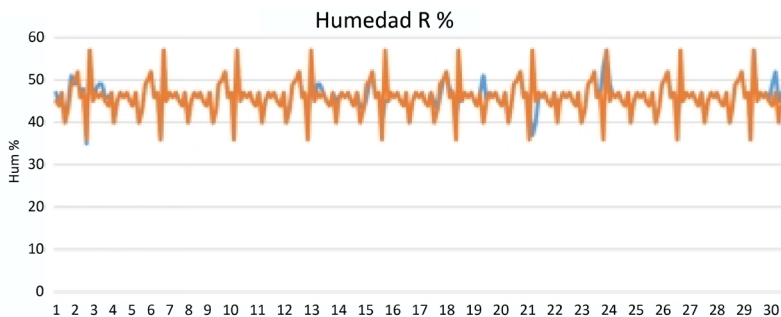
Nota. Cuastumal (2023).

Con los datos obtenidos se pudo observar una media aritmética de 21,312 en valor de la temperatura del agua y una desviación total de 4,8268. Se realizó una comparación de los datos de temperatura del agua (H₂O), medidos tanto por el sensor termo higrómetro digital Htc2, con sonda de temperatura y humedad, como por el sensor de termocupla max6675. Al finalizar el ciclo de cultivo, se hizo un análisis comparativo de los datos obtenidos, donde se logró evidenciar claramente que el sensor manual exhibió varios errores continuos a lo largo del período establecido de seis días. Tras revisar el sensor manual, se descubrió que estaba descalibrado, lo que llevó a la necesidad de reemplazarlo para mantener un monitoreo preciso de las variables durante el ciclo de cultivo.

- Humedad relativa

Figura 23

Gráfica de humedad relativa



Nota. Cuastumal (2023).

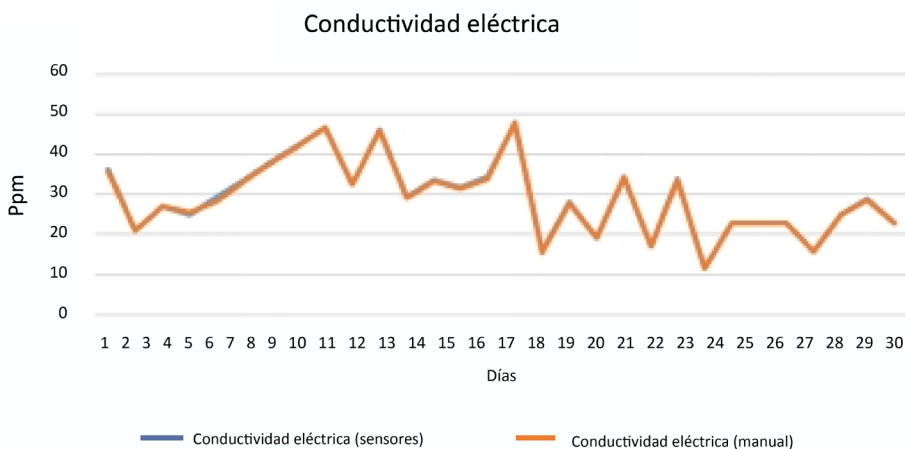
Con los datos obtenidos se pudo observar una media aritmética del 43,10 % en la humedad relativa y una desviación total de 8,5 %.

A continuación, se muestra los datos de humedad relativa obtenidos de dos sensores: el termohigrómetro digital Htc2 y el sensor DHT11, ambos registrando datos a lo largo del ciclo de cultivo. A lo largo del análisis se pudo observar un desfase en los datos del sensor manual en comparación con el sensor automatizado. Tras una revisión detallada, se llegó a la conclusión de que existía la necesidad de reemplazar el sensor manual debido a su carencia de precisión en la toma de datos, lo que podría propiciar el desarrollo de enfermedades en las raíces de las plantas, como la formación de moho. Además, se llevó a cabo la comparación de los sensores de CE, los cuales indican la cantidad de nutrientes presentes en la solución que circuló sobre el cultivo durante las semanas de cultivo.

- Conductividad eléctrica

Figura 24

Gráfica de conductividad eléctrica



Nota. Cuastumal (2023).

Con los datos obtenidos fue posible observar una media aritmética del 581,6 en la CE y una desviación total de 233,94.

Se presenta los datos de CE obtenidos a través de dos sensores: el sensor manual, medidor de CE y probador de agua digital y, el sensor automatizado, conductímetro TDS Meter. Ambos realizaron mediciones a lo largo de las cinco semanas establecidas para el ciclo de cultivo. En la Figura 24 se puede analizar un rango de error mínimo en el proceso de medición, lo cual aseguró que los sensores operaran de manera adecuada, ya que sus valores son altamente precisos.

Cámara

A continuación, se muestra un colaje ilustrativo de las imágenes obtenidas a través de la cámara instalada, la cual tomó un video un total aproximado de 42 horas.

Figura 25

Crecimiento de las lechugas



Resultados esperados

Después de realizar el proceso investigativo, se evidenció diversas oportunidades de mejora dentro del cultivo en estudio. Uno de los aspectos más destacados es la implementación de energía solar como una solución técnica viable, por cuanto es una forma de energía renovable que se obtiene a partir de la radiación solar y se convierte en electricidad mediante paneles solares. Esta alternativa es altamente sostenible y respetuosa con el medio ambiente, contribuyendo a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la dependencia de fuentes de energía no renovables. Integrar sistemas de energía solar en el cultivo no solo puede reducir los costos operativos a largo plazo, sino que puede promover la autosuficiencia energética y la resiliencia frente a fluctuaciones en los precios de la energía convencional. En definitiva, aprovechar la energía solar representa un paso significativo hacia la creación de un entorno agrícola más sostenible y ecoamigable, en línea con los objetivos de mitigación del cambio climático y la preservación del medio ambiente para las futuras generaciones.

Conclusiones

Los cultivos hidropónicos ofrecen una solución a las dificultades asociadas con el cultivo en suelos, permitiendo una administración precisa de nutrientes para un desarrollo óptimo de las plantas. La combinación de automatización y visión artificial en este contexto brindó la capacidad de monitorear y controlar variables clave, lo que resultó en un crecimiento exitoso de las lechugas, una reducción de pérdidas y una mejora en la supervisión general del agricultor.

Es vital mejorar nuestro prototipo actual, migrando hacia el uso de sensores industriales diseñados para un uso continuo y condiciones operativas más exigentes. Esto asegurará un rendimiento constante y fiable del sistema, sin interrupciones.

La adopción de fuentes de energía renovable no solo promueve la autosuficiencia y sostenibilidad del sistema, sino que genera ahorros significativos a lo largo del tiempo en los costos de producción del cultivo. Esta transición hacia energías limpias beneficia al medio ambiente y, resulta en una mayor rentabilidad para el agricultor a largo plazo.

Referencias

- Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo. (s.f.). Trastornos musculoesqueléticos. <https://osha.europa.eu/es/themes/musculoskeletal-disorders>
- Beltrano, J. y Giménez, D. O. (2015). *Cultivo en hidroponía*. Universidad Nacional de La Plata (EDULP).
- Cuastumal, D. V. (2023). *Desarrollo de un sistema hidropónico tubular para la producción de hortalizas como apoyo al fortalecimiento de autosuficiencia de la mujer rural en el Contadero* [Tesis de pregrado, Universidad Mariana]. <https://repositorio.umariana.edu.co/handle/20.500.14112/28030?show=full>
- Estrada, C. E. (2013). Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), 75-84.
- García, I. y Caranqui, V. (2015). La visión artificial y los campos de aplicación. *Tierra Infinita*, 1(1), 98-108. <https://doi.org/10.32645/26028131.76>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- Pérez, M. R. (2017). La próxima evolución de internet, una oportunidad para mejorar la competitividad de Colombia en la región. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI*. <https://doi.org/10.26507/ponencia.585>
- Polo, G. A., Benavides, C. J., Astaiza, J. M., Vallejo, D. A. y Betancourt, P. (2016). Determinación de enteroparásitos en *Lactuca sativa* en fincas dedicadas a su producción en Pasto, Colombia. *Biomédica*, 36(4), 525-534. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v36i4.2914>
- Tecnocentry. (s.f.). Cámara de Seguridad Ext Robótica IP Wifi Yoosee Mini PTZ Full HD 1080p – TECNOCENTRY. <https://tecnocentry.com/product/camara-de-seguridad-ext-robotica-ip-wifi-yoosee-mini-ptz-full-hd-1080p/>
- Vistrónica S.A.S. (2020a). Sensor de nivel de líquido con flotador vertical P52 (0-110V) baja presión. <https://www.vistronica.com/sensores/sensor-de-nivel-de-liquido-con-flotador-vertical-p52-0-110v-baja-presion-detail.html>
- Vistrónica S.A.S. (2020b). Módulo sensor de temperatura y humedad DHT11. <https://www.vistronica.com/sensores/modulo-sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11-detail.html>
- Vistrónica S.A.S. (2020c). Sensor de pH analógico para Arduino. <https://www.vistronica.com/sensores/sensor-de-ph-analogico-para-arduino-detail.html>

Vistrónica S.A.S. (2020d). Sensor de conductividad eléctrica analógico para Arduino. <https://www.vistronica.com/sensores/sensor-de-conductividad-electrica-analogico-para-arduino-detail.html>

Vistrónica S.A.S. (2020e). Sensor de temperatura impermeable DFROBOT DS18B20 para Arduino. <https://www.vistronica.com/sensores/temperatura/sensor-de-temperatura-impermeable-dfrobot-ds18b20-para-arduino-detail.html>

Vistrónica S.A.S. (2020f). Raspberry Pi. <https://www.vistronica.com/raspberry-pi/>

Vistrónica S.A.S. (2020g). Módulo sensor DHT22 AM2302 Temperatura y Humedad (Calidad alta). <https://www.vistronica.com/sensores/humedad/modulo-sensor-dht22-am2302-temperatura-y-humedad-calidad-alta-detail.html>

Vistrónica S.A.S. (2020h). Sensor de pH analógico con electrodo industrial para Arduino. <https://www.vistronica.com/sensores/sensor-de-ph-analogico-con-electrodo-industrial-para-arduino-detail.html>

Capítulo 9.

¿Qué tan sostenibles son las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado?¹

Paula Cortés Arévalo

David Becerra Rincón


Juan Sandoval Herrera²

Cítese como: Cortés-Arévalo, P., Becerra-Rincón, D. y Sandoval-Herrera, J. (2024). ¿Qué tan sostenibles son las mezclas asfálticas con grano de caucho reciclado?. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 139-150). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c427>

Resumen

El volumen de residuos de neumáticos generados a nivel mundial, con sus consecuencias sobre el medio ambiente y la salud humana, han hecho surgir alternativas para su valorización. La alternativa más usada es la fabricación de pavimentos flexibles y de láminas impermeabilizantes, por mezcla de asfalto con grano de caucho reciclado (GCR). En pavimentación, esta mezcla se puede realizar mediante dos vías: la seca y la húmeda; pero ¿qué tan sostenibles son estas mezclas? En esta investigación se recolectó información sobre las etapas de estos procesos, las propiedades fisicoquímicas de las materias primas y productos, así como su riesgo para la salud y el medio ambiente, teniendo en cuenta el porcentaje máximo de GCR en el producto final. Luego, se seleccionaron los indicadores de sostenibilidad ambiental, económica y social basados en las frases H de las sustancias y se jerarquizaron los criterios para su evaluación con apoyo de expertos. Finalmente, se hizo el análisis de ciclo de vida (ACV) para fases principales de la vía más sostenible de la etapa anterior. La vía húmeda con un 15 % en masa de GCR con respecto al ligante asfáltico es el método más sostenible, con menores puntajes en el total de los indicadores aire, peligro a la salud y económico; en los indicadores de residuos e impactos al agua, las dos vías fueron iguales. El ACV arrojó que la mezcla asfalto con GCR es un viable con

¹ Capítulo resultado de la investigación: “Evaluación de la sostenibilidad de la producción de asfalto modificado con caucho de neumáticos”, desarrollada desde el 1 de septiembre de 2022 hasta el 1 de septiembre de 2023, en Bogotá, Colombia.

² Doctorando en Proyectos, UNICEPES México; docente investigador Universidad de América; integrante del grupo de investigación GPS, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co 

impactos menores en cuanto a acidificación, eutrofización, calentamiento global e impactos respiratorios, en comparación con procesos afines.

Palabras clave: medio ambiente; gestión ambiental; indicadores ambientales; indicadores socioeconómicos; ingeniería sostenible

Introducción

En 2021, se produjeron a nivel mundial 2.268 millones de unidades de neumáticos, pero esa cifra puede llegar a 2665 millones de unidades en 2027 (Kunecki et al., 2023). Los neumáticos fuera de uso (NFT) llegan a mil millones al año y la cifra sigue creciendo (Dabic-Miletic et al., 2021). Debido a la complejidad de su estructura, formada por diferentes compuestos que cumplen una función particular en pro de la seguridad de los actores viales, así como del desempeño del medio de transporte, su proceso de degradación es lento y su aprovechamiento o valorización es difícil (Araujo-Morera et al., 2021). Algunas de las consecuencias más conocidas de la disposición inadecuada de NFT son: proliferación de vectores, posibilidad de incendios accidentales con la consecuente emisión de gases tóxicos y de efecto invernadero, así como desplazamiento de la población, pérdida de la calidad paisajística, riesgo de derrumbes accidentales, entre otros (Formela, 2021; Xiao et al., 2022).

El vulcanizado del caucho es un proceso termoquímico que le brinda mejores propiedades de desempeño, pero hace difícil la separación de sus componentes para su reciclado (Hoyer et al., 2020). Por tal razón, además de la recuperación de energía y de materiales, se han estudiado diversas maneras de valorizar estos residuos, como pirólisis, gasificación, producción de concreto asfáltico o, producción de composites con plásticos reciclados (Kazemi et al., 2023; Laoutid et al., 2021; Venturelli et al., 2022). Sin embargo, una de las vías más estudiadas es la mezcla del GCR con asfalto para usos en pavimentación y en impermeabilización de superficies (Colom et al., 2023; Chen et al., 2020; Picado-Santos et al., 2020; Rath et al., 2021).

No obstante, el estudio de la sostenibilidad de estos métodos de valorización es aún incipiente, como indican Asres et al. (2021), enfocados en los aspectos técnicos, económicos y ambientales (Pouranian y Shishehbor, 2019). Hace falta integrar costos del proceso, impactos ambientales más importantes y costos sociales, para saber si se trata de un proceso sostenible.

A partir de ello, se evaluó la sostenibilidad de las mezclas asfálticas con GCR sobre la base de los indicadores ambientales, sociales y económicos de los componentes de las llantas y del ligante asfáltico. Se incluyeron las condiciones del proceso de

mezclado por vía seca y por vía húmeda. Finalmente, se compararon los ACV para tres procesos: el que mejores resultados dio del análisis de sostenibilidad; mezcla de asfalto con zeolitas y, fabricación de asfalto para carreteras sin modificación.

Metodología

La primera etapa consistió en la revisión bibliográfica de los conceptos, aplicaciones y metodologías empleadas para la evaluación de la sostenibilidad en mezclas asfálticas con GCR. Esta revisión se realizó en las bases de datos Scopus y Science Direct, con las ecuaciones de búsqueda ‘ground tire rubber’ AND ‘asphalts’ AND ‘sustainability’, para los últimos cinco años en áreas de ingeniería y ciencia medioambiental. Google Scholar se usó, en algunos casos, para ampliar la información. No obstante, en esta revisión no se incluyeron trabajos de grado de pregrado, tesis de maestría o de doctorado, sino, resultados de mezclas en caliente, mezclas tibias y reciclaje *in situ*.

En la segunda etapa, se definieron las fases del proceso de mezclado, también con base en revisiones de literatura anteriores y en trabajos propios, identificando los compuestos presentes, tanto reactivos como productos, las condiciones de operación: temperaturas, tiempos y presiones y, los equipos necesarios.

En la tercera etapa, se seleccionaron los indicadores ambientales, sociales y económicos para este proceso. Con la información clasificada, más las hojas de seguridad de las sustancias involucradas, teniendo en cuenta el sistema global armonizado que define las frases H (United Nations, 2011), se calcularon los indicadores de sostenibilidad económico, ambiental y social, teniendo como base la metodología de cálculo desarrollada por Narváez et al. (2020). Algunos fueron encontrados directamente para el asfalto, como los de potencial de acidificación, potencial de calentamiento global y agotamiento de capa de ozono (Praticò et al., 2020), pero, en su gran mayoría, fueron calculados.

En la cuarta etapa, a partir de los cálculos de los balances de materia tomando como flujo de entrada el 25 % de 958 500 neumáticos dispuestos inadecuadamente en calles y rellenos sanitarios en Colombia en 2020 (Revista Semana, 2021) y, teniendo en cuenta que el porcentaje en masa del caucho, tanto natural como sintético, en una llanta varía de acuerdo con el fabricante y tipo de llanta, pero se puede asumir un 45 % (Xiao et al., 2022), se determinó la sostenibilidad para cada una de las vías seca y húmeda, variando los porcentajes de GCR, considerando los máximos porcentajes de caucho que se podía incorporar para ambas vías, de modo que se garantizara la mínima sostenibilidad y sus propiedades mecánicas y reológicas necesarias, según la literatura.

La quinta etapa consistió en la determinación del índice acumulativo de sostenibilidad para la vía más sostenible de la etapa anterior, teniendo como otro insumo, el resultado de las encuestas a 14 expertos en temas de vías, sostenibilidad,

gestión ambiental, entre otros, para determinar el peso relativo de cada par de criterios, según una metodología de análisis jerárquico de procesos (AHP, por sus siglas en inglés).

Resultados

Revisión bibliográfica

En la Tabla 1 se muestran los resultados actualizados a febrero de 2024, con la ecuación de búsqueda y los filtros indicados en la sección de metodología. La mayoría de esos resultados se usó como fuente bibliográfica para el desarrollo de esta investigación. En ScienceDirect, cinco de los 86 resultados contienen en su título 'Ground tire rubber'. Se encontró que el tema principal de estos artículos se relaciona con modificación superficial del GCR. Por otra parte, once de los 86 hablan en su título de sostenibilidad enfocada al caucho, otro tipo de residuos que se puede incorporar y uno, sobre movilidad sostenible. En cuanto a Scopus, de los nueve resultados, cuatro tienen que ver con evaluación de propiedades de las mezclas; tres hablan de sostenibilidad en su título, sin evaluar indicadores.

Tabla 1

Resultados de la revisión bibliográfica

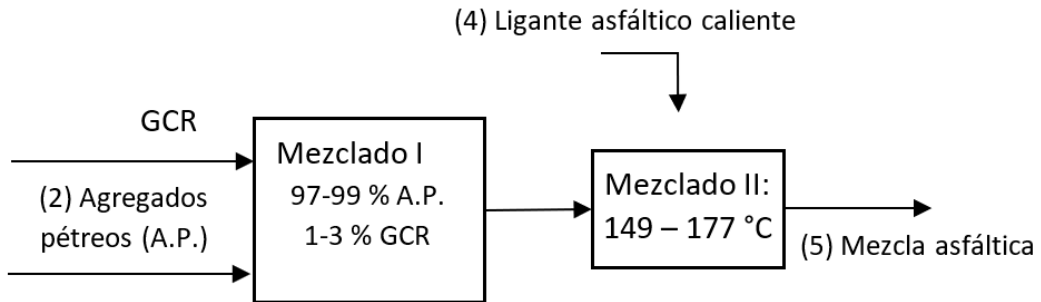
Buscador	Sin filtros	Con filtros
Science direct	162	86
Scopus	12	9

Nota. Datos tomados de las bases de datos Science Direct y Scopus (febrero de 2024). Ecuación de búsqueda: 'Ground tire rubber' AND 'Asphalts' AND 'Sustainability'.

Fases del proceso de mezclado. En la Figura 1 se aprecia la mezcla de asfalto con GCR para la vía seca, la cual consiste en reemplazar parte de los agregados pétreos (del 1 % al 3 %) por GCR para luego mezclar con el ligante asfáltico (Lo Presti, 2013).

Figura 1

Mezcla asfalto – GCR por vía seca

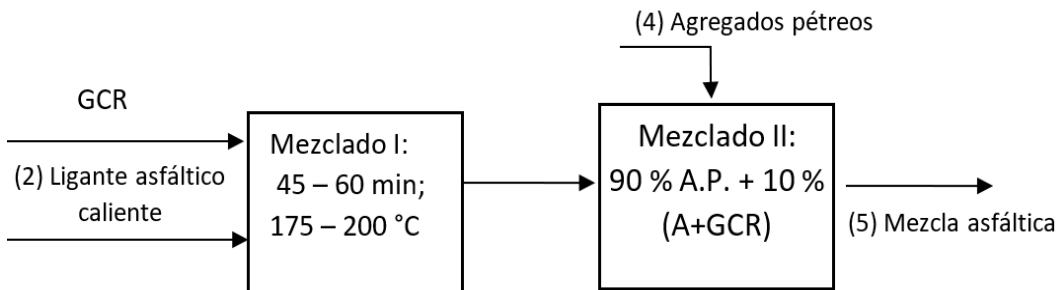


Los porcentajes de GCR pueden variar, dependiendo del tipo de asfalto y, del uso que se le vaya a dar: impermeabilización o pavimentación o, de las condiciones del proceso (Rath et al., 2021).

En la Figura 2 se puede observar la vía húmeda con rangos de algunas de sus condiciones, en la cual se mezcla primero el asfalto con el GCR, para luego añadir el material pétreo. En condiciones normales, se añade del 15 al 22 % en peso de GCR al asfalto en la mezcla I (Rath et al., 2019).

Figura 2

Mezcla asfalto – GCR por vía húmeda



Las temperaturas para la vía húmeda son más altas que para la vía seca. Esto se hace para lograr la incorporación de mayor cantidad de GCR y mejorar la compatibilidad de la mezcla (Xiao et al., 2022); sin embargo, no se debe desconocer los riesgos sobre la salud de los operarios, así como las mayores emisiones de compuestos volátiles que presenta (Formela, 2021).

Cálculo de indicadores de sostenibilidad

En primer lugar, se muestra en la Tabla 2, los balances de materia para la vía húmeda, con un 20 % de GCR en peso. Esto se realizó con cada vía, variando las

concentraciones de GCR entre el 15 al 20 % para la vía húmeda y entre el 1 al 5 % para la vía seca. Todos los flujos son en kg/h.

Tabla 2

Balances de materia para la vía húmeda con 20 % en peso de GCR

Corriente	1	2	3	4	5
Componente	GCR alimentado al mezclador 1	Asfalto alimentado al mezclador 1	Salida del ligante asfáltico	Alimentación de AP al mezclador 2	Salida de asfalto modificado con GCR
Caucho (natural+ sintético)	24,46	0,00	24,46	0,00	24,46
Grava de 1 pulgada	0,00	0,00	0,00	111,63	111,63
Grava de 1/2 pulgada	0,00	0,00	0,00	279,07	279,07
Arena triturada	0,00	0,00	0,00	558,15	558,15
Arena natural	0,00	0,00	0,00	167,44	167,44
Aditivos	0,35	0,00	0,35	0,00	0,35
Asfalto (resto de compuestos)	0,00	99,23	99,23	0,00	99,23
Flujo total (Kg/h)	24,81	99,23	124,03	1116,29	1240,33

Con las ecuaciones dadas por Narváez et al. (2020), que dependen de la concentración de los componentes en la mezcla, se calcularon los indicadores de sostenibilidad. Como se esperaba, a mayor porcentaje de GCR, más altos los indicadores. Por tal razón, para comparar la sostenibilidad de las dos vías, se tomó las mezclas con menores porcentajes en masa de GCR: con 15 % para la vía húmeda y con 1 % para la vía seca. En la Tabla 3 se indica los resultados de estos indicadores normalizados.

Tabla 3

Valores de los indicadores normalizados por dimensión.

Dimensión	Grupo de indicadores	Indicador normalizado	Vía húmeda al 15%	Vía seca al 1%	
Económica	Impacto económico	Valor actual total	0,064	0,073	
		Peligro para la vida acuática	0,318	0,317	
		Peligro para la vida acuática a largo plazo	0,315	0,315	
		Promedio	0,317	0,316	
Ambiental	Impactos al agua	Potencial de calentamiento global	0,135	0,141	
		Potencial de agotamiento de ozono	0,133	0,141	
		Potencial de acidificación	0,133	0,140	
			Promedio	0,134	0,140
	Impactos por residuos	Indicador de fuentes renovables	0,997	0,998	
		Biodegradabilidad	0,032	0,032	
		Promedio	0,514	0,515	
	Peligros físicos	Flamabilidad	0,158	0,158	
		Autocalentamiento	0,002	0,001	
		Temperatura	0,500	0,500	
Promedio		0,220	0,220		
Toxicidad aguda		0,003	0,002		
Irritación a los ojos		0,002	0,001		
Irritación a la piel		0,239	0,238		
Social	Peligros a la salud	Irritación respiratoria	0,003	0,002	
		Peligro por inhalación	0,315	0,315	
		Carcinogenicidad	0,085	0,092	
		Daño a la fertilidad	0,400	0,405	
		Daño a los órganos en exposición prolongada	0,0002	0,0001	
		Promedio	0,1309	0,1319	

Nota. Basado en Narváez et al. (2020).

Cálculo de pesos de los indicadores y determinación de la ruta más sostenible. En la Tabla 4 se pueden observar los pesos relativos de cada grupo de indicadores, en este caso de cada indicador de sostenibilidad, luego de comparar los seis grupos de indicadores por pares y verificar la consistencia de los datos:

Tabla 4

Pesos relativos

Grupo de indicadores	Peso relativo (%)
Impacto económico	7,9
Impactos al agua	23,3
Impactos al aire	24
Impactos por residuos	15
Peligros físicos	13,2
Peligros a la salud	16,6

Nota. La metodología detallada del cálculo de los pesos relativos, aunque para otra aplicación. En Mendoza et al. (2019).

Los impactos al aire, los impactos al agua y los peligros a la salud son los grupos de indicadores con mayor peso relativo según los encuestados. Estos pesos son multiplicados por los indicadores y se totaliza el índice acumulativo de sostenibilidad, cuyos resultados se evidencian en la Tabla 5.

Tabla 5

Selección de vía más sostenible

Grupo de indicadores	Vía húmeda al 15% GCR	Vía seca al 1% GCR
Impacto económico	0,005	0,006
Impactos al agua	0,074	0,074
Impactos al aire	0,032	0,034
Impactos por residuos	0,077	0,078
Peligros físicos	0,029	0,029
Peligros a la salud	0,022	0,022
Índice acumulativo de sostenibilidad	0,239	0,241

Nota. Los pesos relativos son multiplicados por los promedios de los grupos de indicadores. La ruta más sostenible es la de menor índice acumulativo, en este caso la vía húmeda. Basado en Narváez et al. (2020).

Las dos vías presentan índices acumulativos bastante similares. Las pequeñas diferencias se dan en los impactos al aire e impactos por residuos, que son ligeramente mayores en la vía seca, porque la vía húmeda puede sustituir mayor porcentaje de asfalto que, al calentarse, tiene mayor potencial de calentamiento global y de agotamiento de capa de ozono por sus componentes volátiles. De forma similar ocurre con los indicadores de residuos, en especial por la biodegradabilidad que es inferior en los componentes del asfalto con respecto a los componentes del caucho. El grupo de indicadores de peligros a la salud es igual en ambas vías. El indicador económico es bajo en ambas vías porque las materias primas son residuos: el asfalto, de la destilación del crudo; el GCR de las llantas usadas.

Conclusiones

Ambas vías de incorporación de GCR al asfalto, como método de valorización de los residuos de llantas usadas, presentan valores similares en cuanto a sus indicadores de sostenibilidad por componentes individuales, tanto del asfalto como del GCR. Sin embargo, la vía húmeda tiene un mejor índice acumulativo de sostenibilidad porque, al sustituir mayor porcentaje de asfalto por GCR, se reduce la concentración de componentes volátiles presentes en el asfalto, con la consecuente disminución de sus indicadores, principalmente en impactos al aire.

Aunque este es un acercamiento a la evaluación de sostenibilidad del proceso de mezclas asfálticas con GCR, hace falta un estudio detallado de toda la cadena de valor del proceso desde la obtención del GCR hasta la implementación, puesta en marcha y tiempo de vida útil de la carretera.

Referencias

- Araujo-Morera, J., Verdejo, R., López-Manchado, M. Á., & Hernández, M. (2021). Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model. *Waste Management*, 126, 309-322. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.025>
- Asres, E., Ghebrab, T., & Ekwaro-Osire, S. (2021). Framework for design of sustainable flexible pavement. *Infrastructures*, 7(1), 6. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7010006>
- Chen, S., Ge, D., Jin, D., Zhou, X., Liu, C., Lv, S., & You, Z. (2020). Investigation of hot mixture asphalt with high ground tire rubber content. *Journal of Cleaner Production*, 277, 124037. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124037>
- Colom, X., Girbau, J., Marin, M., Formela, K., Saeb, R. M., Carrillo, F., & Cañavate, J. (2023). New approach in the reuse of modified ground tire rubber as thermal and acoustic insulation to be used in civil engineering. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(6), 3557-3566. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01778-6>
- Dabic-Miletic, S., Simic, V., & Karagoz, S. (2021). End-of-life tire management: a critical review. *Environmental science and pollution research*, 28, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16263-6>
- Formela, K. (2021). Sustainable development of waste tires recycling technologies—recent advances, challenges and future trends. *Advanced industrial and engineering polymer research*, 4(3), 209-222. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2021.06.004>
- Hoyer, S., Kroll, L., & Sykutera, D. (2020). Technology comparison for the production of fine rubber powder from end of life tyres. *Procedia Manufacturing*, 43, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.135>
- Kazemi, M., Parikhah, S., Yazdani, H., & Fini, E. (2023). Review and perspectives of end-of-life tires applications for fuel and products. *Energy & Fuels*, 37(15), 10758-10774. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c00459>
- Kunecki, P., Cader, J., & Wdowin, M. (2023). Review in waste tire management—Potential applications in mitigating environmental pollution. *Materials*, 16(17), 5771. <https://doi.org/10.3390/ma16175771>

- Laoutid, F., Lafqir, S., Toncheva, A., & Dubois, P. (2021). Valorization of recycled tire rubber for 3D printing of ABS-and TPO-based composites. *Materials*, 14(19), 5889. <https://doi.org/10.3390/ma14195889>
- Lo Presti, D. (2013). Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 49, 863-881. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.007>
- Mendoza, A., Solano, C., Palencia, D. y García, D. (2019). Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos. *Ingeniare, Revista Chilena de Ingeniería*, 27(3), 348-360. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052019000300348>
- Narváez, P., Serna, J., Orjuela, Á., & Camargo, M. (2020). Sustainability assessment for chemical product and process design during early design stages. *Towards Sustainable Chemical Processes*, 3-41. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818376-2.00001-6>
- Picado-Santos, L. G., Capitão, S. D., & Neves, J. M. (2020). Crumb rubber asphalt mixtures: A literature review. *Construction and Building Materials*, 247, 118577. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118577>
- Pouranian, M. R. & Shishehbor, M. (2019). Sustainability assessment of green asphalt mixtures: A review. *Environments*, 6(6), 73. <https://doi.org/10.3390/environments6060073>
- Praticò, F. G., Giunta, M., Mistretta, M., & Gulotta, T. M. (2020). Energy and environmental life cycle assessment of sustainable pavement materials and technologies for urban roads. *Sustainability*, 12(2), 704. <https://doi.org/10.3390/su12020704>
- Rath, P., Love, J., Buttlar, W., & Reis, H. (2019). Performance analysis of asphalt mixtures modified with ground tire rubber modifiers and recycled materials. *Sustainability*, 11(6), 1792. <https://doi.org/10.3390/su11061792>
- Rath, P., Clark, R., Zuberer, D., & Buttlar, W. (2021). Advances in Pavement Performance Enhancement with Dry Process Engineered Ground Tire Rubber. *Airfield and Highway Pavements*, 172-183. <https://doi.org/10.1061/9780784483510.017>
- Revista Semana. (2021, 16 de abril). En Colombia, cada año 950.000 llantas usadas van a parar a la basura. <https://www.semana.com/economia/inversionistas/articulo/en-colombia-cada-ano-950000-llantas-usadas-van-a-parar-a-la-basura/202129/>

United Nations. (2011). *Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals* (GHS) (4rd ed.). United Nations.

Venturelli, M., Falletta, E., Pirola, C., Ferrari, F., Milani, M., & Montorsi, L. (2022). Experimental evaluation of the pyrolysis of plastic residues and waste tires. *Applied Energy*, 323, 119583. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119583>

Xiao, Z., Pramanik, A., Basak, A., Prakash, C., & Shankar, S. (2022). Material recovery and recycling of waste tyres. A review. *Cleaner Materials*, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100115>

Capítulo 10.

Crisis ambiental y su gestión en sistemas dinámicos empresariales en Popayán, Cauca

Wilson Andrés Betancourt Villalobos

Paola Alejandra Riascos López

Cítese como: Betancourt-Villalobos, W. A. y Riascos-López, P. A. (2024). Crisis ambiental y su gestión en sistemas dinámicos empresariales en Popayán, Cauca. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 151-158). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c428>

Resumen

Este texto explora las herramientas de marcos teóricos poco usados en el análisis de las dinámicas empresariales relacionados con el manejo ambiental; la aplicación del estudio permite focalizarse en la ciudad de Popayán, donde se recogió información primaria y secundaria que reflejó los principales momentos de crisis ambiental que ha atravesado el sistema socioecológico local. Entre las conclusiones se observa que, en términos de resiliencia, pese a las modificaciones sufridas en las dinámicas de los ciclos, atravesadas especialmente por las distintas coyunturas de orden antrópico y catástrofes naturales, no se ha logrado resolver todos los problemas por medio de las soluciones adaptativas que se implementó para algunos escenarios empresariales comprometidos con la gestión social y ambiental.

Palabras clave: resiliencia; vulnerabilidad; gestión ambiental; ciclos adaptativos complejos

Introducción

Todos los sistemas socioecológicos atraviesan diferentes procesos de transformación que pueden surgir a partir de eventos naturales tales como: terremotos, inundaciones, huracanes, erupciones volcánicas, entre otros o, pueden ser generados por intervención humana. Muchos de estos eventos tienen diferentes niveles de impactos, tanto positivos como negativos que, pueden ser absorbidos y adaptados por el sistema para obtener como resultado, formas de resiliencia que ayudan a enfrentar los momentos de crisis. Para una ciudad como Popayán, las transformaciones aparecen constantemente y suelen ser evidentes de forma gradual, dado que los sistemas son cambiantes. No obstante, en esta investigación se tuvo en cuenta dos eventos o perturbaciones que pudieron evidenciar la vulnerabilidad o resiliencia del sistema, enfocados en la gestión ambiental de las empresas: el primero es el terremoto que ocurrió en 1983; el segundo, es la normalización de la legislación ambiental que aparece con precisiones en la Constitución Política de Colombia de 1991, así como los aspectos fundamentales del Decreto Ley 2811 de 1974, del cual desprenden leyes y decretos adicionales que conforman un conjunto de normas para el funcionamiento de las empresas. De ahí que, los gobiernos locales y nacionales, así como las comunidades, buscan suplir las demandas de una ciudad en reconstrucción, tras el colapso de gran parte de la infraestructura pública y privada que generó diversos problemas, entre ellos, sanitarios.

En cuanto a la metodología aplicada en este estudio, se hizo una búsqueda bibliográfica con el fin de responder a las necesidades del marco teórico y de recolectar información secundaria de las empresas y de la historia de la ciudad. De este modo, se construyó los criterios de selección de las empresas y se procedió a revisar la base de datos de la Cámara de Comercio del Cauca, donde se evaluó más de 12.000 registros de empresas que cumplen con la función de prestar servicios o de ofrecer productos y, que están legalizadas ante esta entidad. A partir de la selección de las empresas se aplica el análisis de sistemas y se estudia los ciclos atravesados durante los periodos arriba definidos.

Los ciclos adaptativos complejos en las empresas de Popayán

Indagar sobre la historia de experiencias notables que contribuyen a desarrollar modelos de gobernanza eficientes y contextualizados, ayuda a mitigar posibles presiones por medio de la gestión estratégica y una reestructuración enfocada a enfrentar los retos actuales y futuros de las empresas. En este sentido, Garmestani et al. (2020) mencionan la importancia del enfoque de la panarquía para evitar futuros escenarios socioecológicos o económicos indeseados, especialmente desde los impactos ambientales ocasionados por el establecimiento y funcionamiento de empresas en la ciudad de Popayán y, las diferentes estrategias utilizadas para

el cumplimiento de la normatividad dirigida hacia la ecoeficiencia, con el fin de contribuir en la toma de decisiones, definir planes de gestión, proteger los ecosistemas amenazados y, contribuir con la salud de la población.

Dada la complejidad de los sistemas, es posible que ante fenómenos o cambios críticos, se presente modificaciones en las dinámicas de las empresas, lo cual conduce a situarse en un ciclo adaptativo con baja resiliencia y poca acción oportuna en el desarrollo de la ciudad de Popayán; esto desestabiliza el progreso de las empresas, desencadenando la transformación de un sistema que debe reorganizarse para responder con eficiencia y responsabilidad social; además, crea un impacto ambiental que altera la panarquía; es decir, esa estructura jerárquica entre los sistemas humanos y naturales o combinados: humano-naturaleza y socio-ecológicos, en el que, el caos tarda en restablecerse en el tiempo, en especial cuando hay baja resiliencia y acción oportuna como en el caso del desarrollo de la ciudad de Popayán luego del terremoto ocurrido en 1983.

Popayán, ¿ciudad resiliente?

El municipio de Popayán se encuentra ubicado al suroccidente de Colombia; es la capital del departamento del Cauca y, según los datos del censo del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2019), tiene una población estimada de 333.382 habitantes; su área urbana cuenta con un estimado de 273.861 habitantes, mientras el rural se estima en 61.073. Frente a los temas del sector económico, cuenta con 1.547 empresas matriculadas en la Cámara de Comercio. Esta economía se divide en cinco sectores: el sector primario en el cual se encuentran las actividades relacionadas con la agricultura, minería, pesca y, maderera; de otro lado, el sector secundario se compone de las empresas que toman los materiales crudos y los convierten en productos transformados; el sector terciario que se dedica a ofrecer y distribuir servicios; aquí se destaca el comercio al por mayor y al por menor, así como de servicios inmobiliarios; el sector cuaternario se mueve por la distribución de la tecnología de información, consultoría de negocios y servicios financieros; finalmente, el sector quinario que se dedica al entorno de la educación, salud y la investigación (Cámara de Comercio del Cauca, 2021).

Dada la amplia variedad de empresas para analizar, es necesario definir algunos criterios de selección; esto logra responder a las necesidades sobre el análisis de sistemas. El primer paso fue revisar las 12.002 empresas matriculadas ante la Cámara de Comercio del Cauca (2021) y que ofrecen diferentes bienes y servicios en el departamento; luego, se tuvo en cuenta aquellas registradas entre los años 1960 y 2014, periodo en el que se estima que el sistema tuvo dos grandes perturbaciones. Posteriormente, se hizo un proceso de selección de algunas empresas de la ciudad y que actualmente estuvieran vigentes; a partir de este momento, se obtuvo información sobre su fecha de fundación o funcionamiento, líneas de producción o servicios, adicionalmente sobre las acciones o planes

frente a la crisis ambiental, la gestión ambiental, la panarquía y los procesos de logística reversa desarrollados en sus empresas. Por último, se analizó la crisis ambiental a partir de la propuesta realizada por Gunderson y Holling (2003), en la que las organizaciones empresariales, vistas como sistemas complejos, explican su comportamiento por medio de las interacciones entre los agentes, facilitando el surgimiento de nuevas condiciones que logran ser absorbidas por el sistema, con el fin de promover su evolución; en este sentido, el sistema no solo se acomoda a las condiciones cambiantes, sino que, se transforma y permite modificar el entorno.

Walker et al. (2006) señalan que, la primera fase del ciclo, conocida como de crecimiento (r), se caracteriza por la disponibilidad de recursos, estructura de acumulación y alta resiliencia. La estructura y las conexiones entre componentes del sistema incrementan la cantidad de energía requerida para mantenerlo y crecer. La segunda fase (K) es aquella donde el ritmo de crecimiento de la red se ralentiza y el sistema se vuelve más interconectado, menos flexible y más vulnerable a perturbaciones externas. Estas dos fases, r - K se integran en un bucle de crecimiento *foreloop*, corresponde al proceso de sucesión ecológica en los ecosistemas y, constituye los modos de desarrollo en las organizaciones y sociedades.

Gunderson y Holling (2003) indican que la tercera fase es conocida como de liberación o destrucción creativa (Ω), en la que este último término, tomado del economista Schumpeter, se debe a la excesiva conectividad del sistema, donde se libera repentinamente, a causa de ciertos agentes perturbadores. La cuarta fase (α) se conoce como de reorganización y es equivalente a la fase de innovación y reestructuración en la industria o en la sociedad; por ejemplo, en el tipo de procesos económicos y políticas que surgen en tiempos de recesión económica o transformación social. “Estas dos fases constituyen un segundo bucle llamado *backloop*. La nueva fase r' podría ser similar a la fase r previa o ligeramente diferente” (Walker et al. 2006, p. 2); en tal caso, ya se ha generado un nuevo ciclo.

El primer bucle es predecible, con altos grados de confiabilidad y, tiene como objetivo, maximizar la producción y acumulación; pero, el segundo bucle de reorganización, cuyo objetivo es maximizar la invención y la redistribución, puede ser altamente impredecible y con gran incertidumbre. Se sugiere que un sistema complejo adaptativo, como los sistemas socioecológicos, transiten por estos dos bucles de manera secuencial en cierta escala. Los dos objetivos no pueden darse al mismo tiempo, y el logro de uno sienta las bases para el logro del siguiente. Entonces, el ciclo adaptativo involucra el crecimiento y la estabilidad, por un lado, y el cambio y la reorganización por el otro (Gunderson y Holling, 2003).

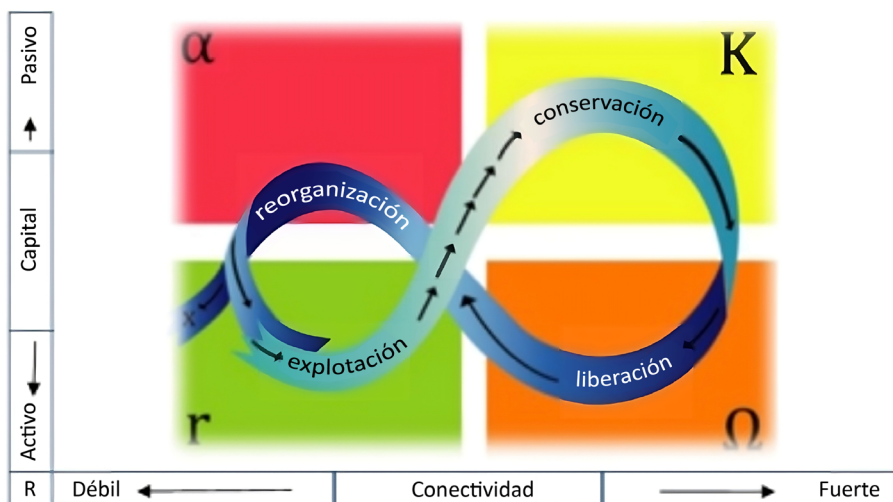
Así pues, en un ciclo adaptativo se alternan períodos de incorporación y transformación de los recursos y períodos más cortos que generan oportunidades para la innovación y el cambio. Los ciclos adaptativos exhiben dos fases importantes o transiciones: la primera, denominada *foreloop* (puede traducirse como ‘ciclo

hacia adelante'), desde r y hacia k , es una fase lenta e incremental en términos de crecimiento y acumulación. La segunda, denominada como *backloop* (ciclo hacia atrás) es una fase rápida de reorganización donde tiene lugar la renovación y se crea las ventanas de oportunidad para la innovación. Los sistemas y ciclos adaptativos complejos, tales como las organizaciones empresariales, pueden ser comprendidos a partir de la emergencia, la autoorganización y la evolución, características relacionadas con comportamientos no lineales alejados del equilibrio. Por lo tanto, la búsqueda de equilibrios (estabilidad) que caracteriza a la administración desde la corriente de pensamiento principal, deja de ser pertinente para el estudio de la organización, dado que reduce los niveles de creatividad e innovación, al igual que limita la capacidad de respuesta a las condiciones cambiantes del entorno (Bohórquez, 2013).

Algunos de los autores mencionados coinciden en la necesidad de establecer estrategias ambientales y de protección de los ciudadanos frente al crecimiento económico sin control y estudiar las organizaciones en busca del equilibrio del entorno y de una economía menos dañina y más ecologista dentro del capitalismo. Esto implica pensar la panarquía entre el sistema económico versus el sistema natural para contribuir a la resolución de la problemática urbano-regional, comenzando por retomar e historiar el impacto del terremoto y la crisis ambiental que este suscitó.

Figura 1

Dinámica de un sistema adaptativo



Nota. Para realizar el análisis del sistema, Gunderson y Holling (2003) identifican cuatro fases en el ciclo; la primera se denomina Explotación; se refiere a una nueva organización político/social del sistema que resulta a partir de la acumulación de experiencias pasadas; la segunda es de conservación, en la que se mantiene y

robustece el nuevo sistema; la tercera es la de liberación, considerada como la parte crítica del sistema, ya que ingresa una perturbación; la cuarta, de reorganización, donde se evidencia en el sistema los cambios que conducirían a iniciar un nuevo ciclo. Fuente: Gunderson y Holling (2003).

De acuerdo con la teoría expuesta, se analiza tres empresas bajo la teoría de los ciclos adaptativos complejos, evidenciando que durante el primer ciclo de explotación (r), las tres inician sus operaciones, pero sin contar con la aplicación de normas ambientales en sus procesos, por lo que no realizaban algún tipo de manejo o control de frente a sus impactos sobre el medio ambiente. Al trascender a la segunda fase, se evidencia una constante para ellas; esto les permite un mejor posicionamiento en el mercado, haciéndolas más estables e incrementando su nivel de productividad; esta fase se denomina de acumulación (K), momento durante el cual se presenta una catástrofe en la ciudad, con el terremoto de 1983. Aunque las empresas reportan daños materiales en su infraestructura, logran continuar con sus operaciones luego del colapso social y económico; esta fase se designa de liberación o renovación (Ω), pues tras la avería de las edificaciones y la pérdida de la vida de cientos de personas, el sistema se ve obligado a avanzar hacia el último ciclo denominado de reorganización (α). Luego de que las empresas adquirieran préstamos o inversiones a fin de reconstruir las instalaciones averiadas y mejorar sus equipos y maquinarias, perfeccionaron los procesos de producción e integraron los planes de contingencia ante futuros eventos como el ocurrido; estos también incluyeron los procesos de planeación para el control del material particulado y de residuos líquidos. Hasta este punto se da por terminado un ciclo del sistema y se abre la puerta hacia la panarquía, dado que el sistema evoluciona nuevamente hacia la primera fase; en este escenario, la perturbación que ingresa al sistema no es un evento natural sino la vigencia de nuevos lineamientos ambientales como los establecidos en el articulado con relevancia ambiental de la Constitución Política de Colombia en 1991 y la Ley 99 de 1993, por medio de sus decretos y resoluciones reglamentarias; esto generó presión a las empresas en términos ambientales, las cuales se encontraban en proceso de recuperación luego del terremoto.

En este primer momento de un nuevo ciclo, luego de la reconstrucción de la infraestructura para el funcionamiento de las empresas, se incrementa la producción tras la inyección de capital, lo que permite transitar de la fase de crecimiento o explotación (r') hacia la fase de conservación o acumulación (k'), puesto que se evidencia un periodo de recuperación de capital empresarial que les permite tener un nuevo impulso en el mercado. Sin embargo, en la fase de liberación (Ω') surgen reclamos por parte de la comunidad ante el poco control de la autoridad ambiental tras las emisiones atmosféricas; por tanto, se sugiere a las empresas aplicar normas ambientales en sus procesos productivos. Durante la última fase del ciclo, es decir, la de reorganización (α'), las empresas implementan el uso de tecnología y técnicas para el manejo ambiental, impulsadas principalmente con el objetivo de dar cumplimiento a la norma; esto permitió además, la elaboración de los Planes

de Manejo Ambiental por su parte, para dar buen tratamiento de las emisiones atmosféricas y de residuos sólidos, avalado por la Corporación Regional del Cauca (CRC); de igual forma, mejorar las condiciones laborales de los empleados; de esta manera se concluye el ciclo e inicia una nueva fase.

Conclusiones

Existen factores como las relaciones de poder y las estructuras económicas, entre otras, que desempeñan un papel importante en la capacidad adaptativa del sistema sociológico. En este sentido, es primordial conocer los procesos históricos, ya que ayudan a diagnosticar e identificar las características y manifestaciones de las empresas en el medio natural frente a una crisis; en este caso, de la ciudad de Popayán.

El estudio encontró que, solo tres de las empresas creadas antes del terremoto, actualmente implementan la planificación ambiental por medio de estrategias y planes de manejo, con el fin de atender la crisis ambiental por medio de programas preventivos para enfrentar la contaminación del ambiente, el daño a la propiedad y, reducir el impacto ambiental de su actividad productiva. Además, se observó la efectiva divulgación del conocimiento respecto a la legislación y la normatividad ambiental. En este proceso avanzan otras siete empresas desde hace dos décadas, diseñando estrategias ambientales que logran presentar cambios paulatinos dadas las necesidades y el tipo de producción, aunque no exista un capital asignado para estos procesos.

Finalmente, ante la baja capacidad de resiliencia de las empresas para responder eficazmente ante los momentos de emergencia y contingencia, se retrasa el potencial desarrollo de la ciudad, como se observó en el periodo posterremoto, donde algunas de ellas no contaban con planes de manejo ni estrategias ambientales, ante lo cual debieron diversificar sus líneas productivas para atender el suceso, lo que condujo a un fuerte impacto ambiental acompañado de la carencia de instituciones de control y de planes de contingencia.

Referencias

- Bohórquez, L. E. (2013). La organización empresarial como sistema adaptativo complejo. *Estudios Gerenciales*, 29(127), 258-265. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2013.05.014>
- Cámara de Comercio del Cauca. (2021). Estimación de potencial de comerciantes. Departamento del Cauca, año 2021. https://www.ccauca.org.co/camara-web/_lib/file/doc/archivos/estimacion_de_comerciantes_2021_v.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2019). Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/información-técnica/presentaciones-territorio/190814-CNPV-presentacion-Resultados-generales-Cauca.pdf>
- Garmestani, A., Twidwell, D., Angeler, D. G., Sundstrom, S., Barichiev, C., Chaffin, B. C., Eason, T., Graham, N., Granholm, D., Gunderson, L., Knutson, M., Nash, K. L., Nelson, R. J., Nystrom, M., Spanbauer, T. L., Stow, C. A., Allen, C. R. (2020). Panarchy: opportunities and challenges for ecosystem management. *Frontiers in Ecology and Environment*, 18(10), 576-583. <https://doi.org/10.1002/fee.2264>.
- Gunderson, L. H. & Holling, C. S. (2003). Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems. *Biological Conservation*, 114(2), 308-309. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(03\)00041-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(03)00041-7)
- Ley 99 de 1993. (1993, 22 de diciembre). Congreso de la República de Colombia. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>
- Walker, B., Gunderson, L., Kinzig, A., Folke, C., Carpenter, S., & Schultz, L. (2006). A handful of heuristics and some propositions for understanding resilience in socio-ecological systems. *Ecology and Society*, 11(1), 13. <https://doi.org/10.5751/ES-01530-110113>

Capítulo 11.

Desafíos y perspectivas de la acuicultura de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) desde un enfoque hidrosocial

María Fernanda Tulcán Eraso

Ángela Margarita Moncaleano Niño

Rosa Catalina Hernández Gómez

Nadson Ressayé Simões

Cítese como: Tulcán-Eraso, M. F., Moncaleano-Niño, Á. M., Hernández-Gómez, R. C. y Ressayé-Simões, N. (2024). Desafíos y perspectivas de la acuicultura de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) desde un enfoque hidrosocial. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 159-179). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c429>

Resumen

Abordar los problemas ambientales relacionados con el recurso hídrico desde un enfoque hidrosocial permite analizar de una manera holística las interrelaciones entre el ser humano y la naturaleza. En este sentido, uno de los problemas socioambientales existentes en la Laguna de La Cocha, es el asociado al componente hídrico, generado por los proyectos truchícolas en jaulas flotantes. El objetivo de esta investigación fue formular una propuesta de gestión de la producción intensiva de trucha arcoíris (*O. mykiss*), desde un enfoque hidrosocial. La investigación fue realizada bajo un análisis de tipo cualitativo y se desarrolló a partir de un estudio de caso en la vereda El Naranjal, Pasto. La metodología consideró herramientas de Diagnóstico Rural Participativo y de análisis estructural de variables. Como resultado, se determinó los impactos y las actividades más significativas que afectan los componentes del ambiente y, se propuso estrategias de gestión ambiental. Se concluye que la utilización del enfoque hidrosocial en el análisis de los sistemas productivos permite comprender las dinámicas entre los actores y sus interrelaciones con la naturaleza, lo que ayudará a mejorar la gestión de los recursos asociados con la producción de trucha arcoíris.

Palabras clave: gestión ambiental; lago Guamuez; diagnóstico ambiental; impactos ambientales; investigación participativa

Introducción

La pesca y la acuicultura se han desarrollado rápidamente, dada su importancia para la seguridad y calidad alimentaria, así como para la generación de empleo (Naylor et al., 2021; Bjørndal et al., 2024; Einarsson y Óladóttir, 2020; Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2022). En este sentido, la producción mundial de pescado alcanzó en 2018 un máximo de 179 millones de toneladas, de las cuales el 52 %, para consumo humano, provino de la acuicultura (Bartley, 2022; FAO, 2020). Este alcance se debe a la estabilidad relativa de la producción de la pesca de captura y al continuo crecimiento de la acuicultura (FAO, 2018). Ahmed y Thompson (2019) señalan que, este rápido crecimiento de la acuicultura se ha considerado como la revolución azul.

El desarrollo de la pesca y la acuicultura está vinculado con diez de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), y se incluye en la Agenda 2030, en donde se fija unos objetivos relativos a la utilización de los recursos naturales por parte de estos sectores, que garanticen un desarrollo sostenible (FAO, 2018). Si bien, la acuicultura genera efectos beneficiosos, también es cierto que existen casos de degradación del medio natural, debido a las operaciones intensivas del cultivo en jaulas y a las prácticas de cultivo (Ahmad et al., 2022; Riascos et al., 2012; Risk et al., 2021; Thomas et al., 2021).

Uno de los principales sectores en la economía del Humedal Ramsar Laguna de La Cocha es la acuicultura, caracterizada por la producción de trucha arcoíris (*O. mykiss*) en jaulas flotantes (CORPONARIÑO, 2011). La mayor participación la encabeza la vereda Santa Teresita con 205 Ton/año, seguida de la vereda Mojondinoy con 134 t/año y El Naranjal con 108 t/año (CORPONARIÑO, 2015). Sin embargo, a pesar de que la acuicultura es considerada como una actividad promisoriosa y sostenible, se ha comprobado que la producción intensiva genera impactos al ambiente.

Burbano-Gallardo et al. (2021) y González et al. (2018) demostraron que, el mayor impacto ambiental negativo generado por el cultivo de trucha arcoíris (*O. mykiss*) en jaulas flotantes en la laguna de La Cocha se evidencia en los sistemas de producción con mayor intensidad, debido al alimento no consumido y a los procesos metabólicos de los animales. Según estos mismos autores, se ha comprobado que existen alteraciones sobre el componente hídrico, los sedimentos y las comunidades bacterianas del sedimento de este sistema lenticó oligotrófico como es la laguna de La Cocha. Adicionalmente, como expone el último diagnóstico acuícola de la laguna, la producción anual de trucha arcoíris sobrepasó la capacidad de carga del lago, la cual está determinada en 930 t/año (CORPONARIÑO, 2014), debido a que para el año 2017 se reportó una producción de 1716 t/año de trucha; es decir, 786 t/año más de las que se debería producir (CORPONARIÑO, 2018).

Ardila (2022) y Salin y Arome (2018) sostienen que existe una necesidad en el sector acuícola de planificación y gestión local, nacional e internacional para atender las preocupaciones ambientales, sociales, económicas, así como de salud y de bienestar animal. En este sentido, a nivel local no se ha encontrado investigaciones orientadas al estudio del sistema productivo de trucha arcoíris desde un enfoque hidrosocial, pues la mayoría aborda estas problemáticas a partir de una visión técnica (Burbano-Gallardo et al., 2021; González et al., 2018; Vásquez et al., 2016), lo cual evidencia la necesidad de abordar las problemáticas ambientales asociadas con la producción truchícola desde una dimensión sistémica e integral, a través del enfoque hidrosocial.

Desde este enfoque, la circulación del agua es un proceso social y físico, un flujo híbrido en el que el agua permea las relaciones sociedad-naturaleza (Larsimont y Grosso, 2014). De esta forma, el ciclo hidrosocial se define entre lo hidrológico, el cual examina el ciclo natural del agua dentro del ambiente físico, y lo social, que considera cómo los actores involucrados interactúan con el agua (Budds, 2012; Larsimont y Grosso, 2014). Esta reconceptualización del agua permite comprender más profundamente la interrelación entre la sociedad y el recurso hídrico, dado que el agua es entendida como un recurso que es modificado y definido de distintas maneras por los interesados (Budds, 2012). El objetivo de la presente investigación fue analizar el sistema productivo de trucha arcoíris desarrollado en jaulas flotantes en la vereda El Naranjal, desde un enfoque hidrosocial, para formular una propuesta de gestión que contribuya a la conservación de la laguna de La Cocha, mediante el desarrollo de una producción de trucha con criterios ecosistémicos.

Metodología

Área de estudio. La laguna de La Cocha se ubica en la parte sureste del departamento de Nariño, Colombia (Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, IAvH, 2004). Es un lago tropical de alta montaña, catalogado como Humedal Ramsar de importancia internacional mediante Decreto 0698 de 2000. Es uno de los humedales altoandinos más extensos de Colombia y, sus atributos ecológicos, botánicos, zoológicos, limnológicos e hidrológicos, le confieren especial valor (CORPONARIÑO, 2011).

El corregimiento El Encano es uno de los principales centros poblados del humedal; está constituido por 18 veredas distribuidas alrededor de la laguna (CORPONARIÑO, 2011; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), 2015). La vereda El Naranjal se encuentra ubicada al sureste del corregimiento El Encano (CORPONARIÑO, 2011); se caracteriza por su riqueza cultural, debido a la presencia de comunidades campesinas e indígenas Quillasingas, así como por sus atributos ecológicos, teniendo en cuenta que en el territorio existen cuatro Reservas de Sociedad Civil consideradas como áreas de conservación en el Humedal

Ramsar (CORPONARIÑO, 2011). De esta forma, la metodología que se llevó a cabo desarrolló en tres etapas, las cuales se describe en los siguientes apartados:

Etaapa 1. Caracterización del sistema de producción intensivo de trucha arcoíris en jaulas flotantes. Se identificó a los actores formales e informales que influyen en el sistema de producción de trucha, considerando su escala geográfica. De esta manera, se obtuvo información primaria a través de etnografía, visitas en campo y entrevistas semiestructuradas con los actores. Asimismo, se realizó una revisión bibliográfica para obtener información secundaria complementaria.

Etaapa 2. Análisis estructural de variables. Se constituyó un grupo focal conformado por los piscicultores de la vereda El Naranjal y un representante de la academia, quien a su vez representó a CORPONARIÑO. De esta manera, a través de un trabajo participativo en campo con los actores clave, se desarrolló el taller aplicando la Matriz de Impactos Cruzados Multiplicación Aplicada a una Clasificación (MICMAC), planteada por Godet y Durance (2011); el método consiste en: identificar, describir y calificar las variables para determinar aquellas que son clave en el sistema de producción de trucha del territorio hidrosocial vereda El Naranjal.

Etaapa 3. Elaboración de la propuesta de gestión. Para la formulación de las estrategias de gestión se tuvo en cuenta la metodología de la gestión estratégica propuesta por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA, 2018). De esta manera, a través de un análisis sistémico de la producción de trucha y con la participación de los actores involucrados, se elaboró una propuesta de gestión.

Resultados

Caracterización del sistema de producción de trucha arcoíris en jaulas flotantes

A escala local se evidencia tres grupos de actores: los piscicultores, quienes no participan de asociaciones (13 %), los productores que están vinculados a la Asociación Piscícola el Naranjal Protectores del Bosque (APNPB) (60 %) y los piscicultores que hacen parte de la Asociación Ambiental Productiva Ecoturística y Agropecuaria del Lago (AMPEAGRO) (27 %).

La APNPB fue creada para fomentar la conservación de la flora y la fauna, así como para generar oportunidades de empleo en la zona. Este grupo de actores se ha organizado como asociación para abastecer la demanda de pescado de los mercados. Está conformada por once familias pertenecientes a la vereda El Naranjal. La AMPEAGRO fue creada con el fin de viabilizar la ejecución de proyectos agrícolas y acuícolas ante las instituciones, así como para generar empleo para los habitantes del territorio. Está conformada por 18 familias, 14 de ellas son de la vereda El Naranjal.

El tercer grupo de actores corresponde a la comunidad indígena representada por el Resguardo Indígena Quillasinga Refugio del Sol. Se consideró a este grupo de actores, debido a que el resguardo ha establecido sus propias reglas de uso del agua en el territorio, dado que conceden permisos a la comunidad indígena para el desarrollo de la piscicultura.

Con respecto a la trayectoria de los piscicultores, el 80 % de los productores lleva más de diez años en esta actividad; el 20 % lleva menos de cinco años. Antes de la producción de trucha arcoíris, el 46,66 % de los piscicultores se dedicaba a la explotación del bosque para la producción y comercialización de madera y carbón; el 53,34 %, al turismo en lancha y a la agricultura. Este grupo de actores locales está relacionado directamente con las unidades de recurso.

Aspectos productivos

La semilla de trucha arcoíris es adquirida en estaciones locales ubicadas en el corregimiento El Encano, desde tallas entre 4 a 10 cm. El ciclo de producción que se maneja comprende las fases de inicio, levante y finalización. En cuanto al número de unidades de cultivo instaladas, el 60 % de los productores posee entre cinco a doce jaulas flotantes, mientras que el 33,3% tiene entre 14 y 15 unidades de cultivo y, el 6,67 % restante cuenta con 20 unidades. Las jaulas están construidas artesanalmente de forma rectangular y poseen un volumen promedio de 60 m³.

Respecto a la densidad de siembra, el 40% de los piscicultores siembra entre 5000 a 10000 alevinos. Esta cantidad varía de acuerdo con su capacidad de inversión, las temporadas del año y los factores climáticos. El 33,33 % maneja una densidad de siembra permanente de 5000 alevinos. El 13,33 % siembra un promedio de 10000 alevinos de trucha, mientras que el 6,67 % siembra 9000 y el otro 6,67 % siembra 20000 alevinos. Los piscicultores de la vereda El Naranjal manejan una producción escalonada que les permite una producción continua durante todo el año. La duración del ciclo está determinada por aspectos como la calidad de la semilla, el manejo que se realiza en el cultivo, los parámetros fisicoquímicos del medio de cultivo y los factores climáticos. Asimismo, los ciclos de producción varían entre tres y diez meses, dependiendo de las diferentes presentaciones que se maneje en el mercado y de los factores mencionados. De esta manera, de acuerdo con las variables de producción, en la vereda El Naranjal se genera 165 t/año.

Una de las variables que más impacto ha generado en la producción de trucha arcoíris en esta vereda es la mortalidad. El mayor valor reportado fue del 40 % y en época de invierno fue del 70 %. Según los piscicultores, no es factible producir trucha en época lluviosa, dado que durante este período se incrementa el porcentaje de mortalidad de los animales; aluden que esto se debe a: cambios en las condiciones climáticas, como las temperaturas extremas, incremento de las precipitaciones en época lluviosa, proliferación de enfermedades, calidad

de la semilla y, particularmente, la disminución del oxígeno del agua y la falta de alcantarillado en el territorio El Encano. Según ellos, una de las causas de la disminución del oxígeno se da por los sedimentos producidos por los grandes productores de trucha, que están ubicados en la zona norte de la laguna, dado que poseen cultivos intensivos que generan mayores desechos, que se acumulan en el fondo de la laguna y afectan los cultivos de las veredas que están ubicadas en la zona sur del lago.

Con relación a las salas de proceso, el 80 % de las estaciones piscícolas cuenta con salas artesanales destinadas a la transformación de los animales, donde se incluye actividades como: sacrificio, eviscerado, lavado y pesaje de los ejemplares. El 13 % no cuenta con un cuarto de evisceración, a pesar de que se realiza el lavado y la evisceración de los animales. El 7 % restante no tiene sala de evisceración, debido a que la trucha es comercializada entera. Se apreció que, para llevar a cabo los procesos de poscosecha existen falencias en la infraestructura, equipos e insumos necesarios, lo que limita otros procesos como: la cadena de frío, el desarrollo de otros mecanismos de sacrificio, el transporte del producto; esto puede repercutir en la calidad. Lo anterior limita la aplicación de las Buenas Prácticas de Producción de la Acuicultura (BPPA) en el proceso productivo.

En lo pertinente al sistema de alimentación, se evidenció que el 60 % de los piscicultores determina las raciones teniendo en cuenta la cantidad, calidad y talla de los animales. El 7 % considera la biomasa. El 13 % de los productores suministra el alimento a saciedad y el 20 % restante cree importante el comportamiento de los animales a la hora de suministrar el alimento. Con relación a la gestión de los subproductos, el 60 % de los piscicultores utiliza las vísceras como materia prima para obtener compostaje. El 26,67 % transforma esta materia prima en alimento para especies menores. El 13,33 % no produce residuos por procesos de eviscerado, pues la comercializan entera.

Conviene mencionar que, dentro de sus prácticas, no se realiza separación en la fuente de los residuos sólidos generados ni se hace una correcta disposición de estos. En cuanto al saneamiento hídrico rural, el 80 % de las estaciones piscícolas de la vereda cuenta con sistemas sépticos, mientras que el 20 % de las estaciones no posee este tipo de sistemas. Según los piscicultores, la falencia en el sistema de saneamiento en algunas veredas representa una amenaza para la calidad del agua de la laguna.

Análisis estructural de variables

Como resultado del análisis situacional, se estableció las variables categóricas que caracterizan el sistema de producción de trucha. De esta forma, se definió en total, 28 variables internas y externas que influyen en el sistema analizado (Tabla 1).

Tabla 1

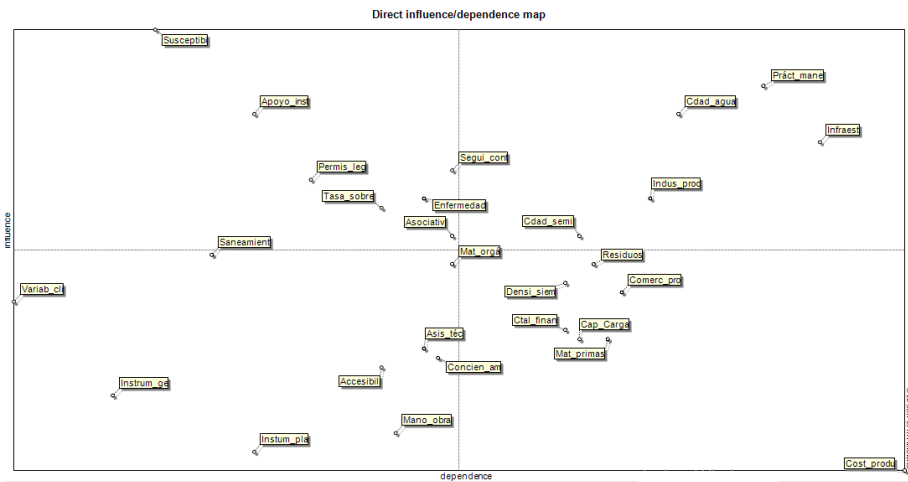
Listado de variables internas y externas que caracterizan el sistema de producción de trucha arcoíris (O. mykiss)

Variables	Nomenclatura	Variables	Nomenclatura
Asistencia técnica	Asis_éc.	Tasa de sobrevivencia	Tasa_sobrev
Materia orgánica	Mat_orgá.	Densidad de siembra	Densi_siembr
Infraestructura	Infraest.	Comercialización del producto	Comerc_prod
Calidad de semilla	Cdad_semill.	Seguimiento y control	Segui_control
Enfermedades en los peces	Enfermedades	Accesibilidad	Accesibili
Apoyo institucional	Apoyo_inst.	Mano de obra	Mano_obra
Calidad del agua	Cdad_agua	Capital financiero	Ctal_financie
Industrialización del producto	Indus_prod.	Permisos y legalizaciones	Permis_lega
Prácticas de manejo	Práct_manejo	Instrumentos de gestión	Instrum_gesti
Materias primas	Mat_primas	Instrumentos de planificación	Instum_plani
Residuos sólidos y líquidos	Residuos	Susceptibilidad a inundación	Susceptibi
Concientización ambiental	Concien_amb.	Variabilidad climática	Variab_clima
Asociatividad	Asociativid.	Capacidad de carga de la LLG	Cap_Carga
Costos de producción	Cost_produc.	Saneamiento básico	Saneamient

Clasificación de las variables clave. El grado de influencia y dependencia de las variables del sistema está representado en el Plano de Influencias y Dependencias (PID) (Godet, 2007), en el cual se presenta la clasificación indirecta de las variables clave (Figura 1).

Figura 1

Plano de influencias y dependencias del sistema de producción de trucha arcoíris (O. mykiss) vereda El Naranjal



Nota. En el cuadrante superior derecho se presentan las variables clave. Software LIPSOR-EPITA-MICMAC (versión 5.3).

Las variables clave para la evolución del sistema analizado, fueron seleccionadas de manera indirecta. En la Figura 1 se presenta la diagonal estratégica, donde están las variables clave ubicadas en el cuadrante superior derecho, cerca de la línea diagonal. Dichas variables son: calidad de la semilla, industrialización del producto, calidad de agua, prácticas de manejo, infraestructura. Se caracterizan por ser muy influyentes y dependientes del sistema; de ahí la importancia de trabajar con ellas, por cuanto son esenciales para la estructuración de las estrategias de gestión.

Discusión

De acuerdo con el estudio realizado, el nivel de producción de las estaciones piscícolas de la vereda El Naranjal es de 165 toneladas anuales de trucha arcoíris. La Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP) reportó en 2019 una producción anual de 87,92 t/año para los doce piscicultores que cuentan con el permiso de cultivo en la vereda (Roca-Lanao et al., 2020). Por otro lado, según el diagnóstico de producción de trucha arcoíris de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural Departamental (SADR), se reporta una producción de 70,92 t/años para 2018 en esta vereda (Gobernación de Nariño, 2018). Las cifras evidencian que la producción de trucha arcoíris ha aumentado considerablemente. Por otro lado, los resultados reflejan que existe una desarticulación entre las instituciones encargadas de levantar este tipo de información técnica, pues de acuerdo con la revisión de los registros, los datos difieren en cuanto al número de piscicultores y la producción anual.

Con relación a la mortalidad, los datos son alarmantes; los piscicultores han asociado esta situación a la disminución del oxígeno en la zona. Al respecto, Ahmad et al. (2021), Boyd et al. (2020) y Carballeira et al. (2021) afirman que, uno de los factores que incide en la sostenibilidad de la actividad acuícola es la óptima renovación de las aguas. En este sentido, las corrientes de la zona donde se encuentran los cultivos deben ser suficientes para evitar que se genere desoxigenación, producto de la acumulación del alimento no consumido y de la materia orgánica por las heces de los animales (Borja, 2002; Fox et al., 2022). Lo anterior indica que es esencial renovar el agua en las zonas de cultivo, para que favorezca la oxigenación y, por ende, mejore la sobrevivencia de los animales. Cabe mencionar que, es necesario evaluar otros factores que pueden estar influyendo en esta variable.

Con respecto a la calidad del agua de la laguna de La Cocha, estudios han demostrado que es un cuerpo de agua con buenas características fisicoquímicas, considerando que en análisis previos de perifiton se observaron géneros que son indicadores de cuerpos de agua con buena oxigenación y condiciones oligotróficas, lo que evidencia una buena calidad del agua (CORPONARIÑO, 2014). Asimismo, en el análisis de perifiton se encontró el género *Cladophora*, alga que se asocia a la presencia de materia orgánica, lo cual indica que existe algún tipo de alteración en la calidad del agua de la laguna (CORPONARIÑO, 2014). González et al. (2018) sostienen que, a pesar de los impactos generados por la piscicultura intensiva, el lago aún no ha sido severamente afectado; esto sugiere que es necesario implementar protocolos de medición, monitoreo y seguimiento de la calidad del agua en las zonas de cultivo, así como, desarrollar los estudios pertinentes para determinar la calidad del agua de la zona, lo que contribuirá a su vez a identificar las causas de las mortalidades de los animales.

En cuanto a la alimentación de los animales, según la FAO (2014), los porcentajes de proteína que manejan los piscicultores están acordes con lo recomendado; el porcentaje más alto se destina para los alevines, que requieren entre un 44 a un 50 % de ella. Asimismo, la frecuencia de alimentación recomendada para esta fase es de ocho raciones diarias, la cual disminuye a medida que el animal va creciendo (FAO, 2014).

Es preciso señalar que el porcentaje de asimilación del nitrógeno contenido en el alimento es del 20 y el 30 %; el contenido restante es desechado en el agua mediante la excreción y a través del alimento no consumido (Naspirán-Jojoa et al., 2022). El alimento en la producción acuícola representa entre el 50 y el 60 % de los costos de producción (FAO, 2014). Por tanto, es importante enfatizar en la cantidad y calidad del concentrado, así como en las técnicas para el suministro del alimento, dado que las prácticas inadecuadas en la alimentación no solamente influyen en el factor económico, sino que causan efectos sobre el ecosistema e incluso sobre el rendimiento de los animales.

Con respecto a la dimensión ambiental, las prácticas de manejo en la producción de trucha arcoíris relacionadas con la gestión de residuos sólidos deben ser de especial atención en los procesos de gestión. En este sentido, considerando la producción acuícola como un sistema socioecológico, Berkes et al. (2003) indican que, el vínculo entre el ecosistema y las prácticas de manejo lo proporciona el conocimiento y la comprensión ecológica. Esto pone en evidencia que un elemento vital en las dinámicas que se suscitan entre las prácticas de manejo - ecosistema es el conocimiento, el cual determina las distintas formas de relacionarse con los recursos. De esta manera, resulta importante enfatizar en fortalecer las capacitaciones a los piscicultores, en las que se incluya temas técnicos y ecológicos para mejorar las prácticas de manejo en el cultivo de trucha y, por ende, en la relación ser humano-naturaleza.

Es de destacar que, además de la normatividad que regula las actividades de producción piscícola en la laguna de La Cocha, existen mecanismos que precisan de acciones voluntarias de los actores que están directamente relacionados con el recurso; por ejemplo, la implementación de buenas prácticas de manejo. En este sentido, Andrade y Onassis (2022), Cardozo (2023) y FAO (2011) refieren que, las mejores prácticas de gestión en la acuicultura requieren no solo de la acción de las autoridades competentes mediante el diseño de políticas, normatividad y procedimientos de gestión, sino también de los acuicultores, a través de las mejores prácticas.

Pese a que llevar buenas prácticas de manejo depende de los piscicultores, es igualmente necesario considerar que el apoyo institucional es primordial para promover una producción más sostenible. En este sentido, Brugere et al. (2023), Faysse et al. (2022), Orach y Schlüter (2021), Partelow et al. (2022) y, Quevedo et al. (2022) manifiestan que, no es suficiente la voluntad de los actores locales para generar cambios, pues se requiere de acciones que deben ser adoptadas a varias escalas por parte de diferentes actores, lo cual evidencia que es fundamental la participación articulada y coordinada de todos los actores involucrados en el sistema de producción.

Análisis estructural de variables

El análisis estructural permitió identificar las variables clave para la evolución del sistema de producción de trucha de la vereda El Naranjal; estas se ubican en el cuadrante superior derecho; se caracterizan por ser muy influyentes y dependientes; perturban el funcionamiento normal del sistema (Arcade et al., 2009; Garza y Cortez, 2011). Asimismo, tienen alta capacidad de influir a las demás variables, pero, a su vez, se dejan influenciar (Arcade et al., 2009; Villegas et al., 2020). Lo anterior indica que, dichas variables condicionan el desarrollo del sistema de producción y, dado su alto nivel de dependencia, se puede tener mayor gobernabilidad sobre estas. De

ahí, la importancia de trabajar con ellas, pues son esenciales para la estructuración de las estrategias de gestión.

De estas variables clave, las más influyentes son: prácticas de manejo, calidad de agua e infraestructura. Sin embargo, a pesar de su alto nivel de influencia, son muy dependientes, por lo que, para actuar sobre ellas se debe trabajar en las variables palanca secundaria y las variables reguladoras (Pérez et al., 2018). De este modo, la asistencia técnica, la conciencia ambiental, la mano de obra, la accesibilidad y la materia orgánica, entre las variables palanca secundaria y, los permisos y legalización, el seguimiento y control, la asociatividad, las enfermedades y la tasa de sobrevivencia, como variables reguladoras, son el puente para influir sobre la evolución de las variables clave.

Enfoque hidrosocial en la gestión integral del recurso hídrico

Para el análisis de la gestión integral del recurso hídrico desde un enfoque hidrosocial se analizó el ciclo hidrosocial. De acuerdo con Linton & Budds, (2014), el ciclo hidrosocial considera la naturaleza social y política de los flujos de agua. De esta manera, la forma cómo el agua fluye en el espacio y el tiempo, está moldeada por instituciones y prácticas humanas, que determinan los modos de control, gestión y toma de decisiones (Linton y Budds, 2014). Esto indica que, en el ciclo hidrosocial de la producción de trucha, intervienen varios actores que determinan los flujos del agua, a través de las prácticas de manejo, los permisos, las normas establecidas, entre otros factores; de manera que, la gestión del recurso hídrico es el resultado de las interacciones entre actores, quienes intervienen en este proceso, dependiendo de sus intereses, posiciones y relaciones de poder.

Asimismo, Douville et al. (2021); Gavrilesco (2021); Linton y Budds (2014); Tang (2020) y Yang et al. (2021) afirman que, al generar alteraciones en el ciclo hidrológico, esto influye en las relaciones sociales. Esto es evidente para el caso de estudio, dado que los cambios en las características fisicoquímicas y biológicas del agua han ocasionado tensiones sociales en la comunidad, sobre todo por la presencia de piscicultores que migran de otras regiones del país para desarrollar la producción de trucha en la laguna de La Cocha, a quienes se les apunta el aceleramiento de los impactos negativos en el cuerpo lacustre, por los cultivos intensivos que desarrollan. En este estudio se concibió a la vereda El Naranjal como territorio hidrosocial, donde existen diferentes interacciones espaciotemporales. Dicho territorio se configura a partir de procesos sociales y naturales, como refiere Swyngedouw (1999). Igualmente, a partir de los argumentos de Boelens et al. (2016) y Linton y Budds (2014), se podría decir que este territorio se construye desde el espacio biofísico, donde surgen diferentes interrelaciones entre las prácticas humanas, el flujo natural del agua y, las relaciones de poder.

Propuesta de gestión

Considerando la información bibliográfica y los resultados del presente estudio, se realizó una propuesta de gestión cuyo objetivo general fue contribuir al desarrollo de la producción de trucha arcoíris en la vereda El Naranjal, con criterios de sostenibilidad. La propuesta se basó en el establecimiento de tres estrategias con diferentes líneas de acción, las cuales fueron planteadas considerando las variables clave del sistema de producción. El plazo de ejecución es a corto plazo, en un tiempo estimado de cuatro años (Tabla 2).

Tabla 2

Estrategias de gestión ambiental asociadas con la producción intensiva de trucha arcoíris (O. mykiss), vereda El Naranjal, laguna de La Cocha

Variables clave	Prácticas de manejo
Eje estratégico	Eje 1. Desarrollo de la acuicultura con enfoque ecosistémico
Estrategias	1) Producción acuícola sostenible
Líneas de acción	1) Producción más limpia
	Manejar tablas de alimentación de acuerdo con la biomasa, para evitar la sobrealimentación o la subalimentación
	Implementar un protocolo de muestreo y registro de los animales
	Verificar la eficiencia de la alimentación, a través de la tasa de conversión alimenticia
	Llevar el registro de las mortalidades, así como de los medicamentos que se utiliza para el tratamiento de las enfermedades
Acciones	Inducir a los peces a la sedación mediante el método de choque térmico con hielo, durante los procesos de poscosecha
	Reportar al ICA las mortalidades inusuales, para que se diagnostique y se implemente las medidas necesarias
	Implementar un protocolo para el monitoreo de la calidad del agua en las zonas de cultivo
	Realizar separación en la fuente de los residuos sólidos (Resolución 2184 de 2019) y, reutilizar aquellos que sean susceptibles de aprovechamiento
	Ejecutar un proyecto piloto para la generación de aceite a partir de las vísceras de trucha arcoíris (O. mykiss) con el fin de aprovechar estos subproductos.

Líneas de acción	2) Capacitaciones y asistencia técnica
Acciones	Establecer convenios y/o alianzas con el SENA e instituciones de educación superior, para coordinar el desarrollo de capacitaciones y talleres dirigidos a los piscicultores
	Diseñar cartillas de información de las principales enfermedades de control oficial de la trucha arcoíris (<i>O. mykiss</i>) y sus alternativas de tratamiento
Líneas de acción	3) Promoción de la piscicultura de especies ícticas nativas
Acciones	Formular y ejecutar proyectos de investigación que contribuyan al desarrollo del paquete tecnológico del capitán de la sabana (<i>E. mutisii</i>).
	Desarrollar cultivos piloto del capitán de la sabana (<i>E. mutisii</i>) para evaluar su comportamiento en cautiverio
	Elaborar estudios de factibilidad en el corregimiento El Encano y en el municipio de Pasto, con el fin de identificar la viabilidad de la producción del capitán de la sabana (<i>E. mutisii</i>)
VARIABLES CLAVE	Infraestructura; Industrialización del producto; Calidad de la semilla; Calidad del agua.
Eje estratégico	Eje 2. Apoyo institucional para el sector acuícola
Estrategias	2) Fortalecer la cooperación institucional para el desarrollo de la acuicultura local
Líneas de acción	1) Apoyo al pequeño productor
Acciones	Crear, fortalecer e implementar mecanismos de articulación interinstitucionales y entre actores sociales
	Apoyar al pequeño productor en el mejoramiento de la infraestructura como: salas de proceso, jaulas flotantes y sistemas de saneamiento básico
	Fortalecer el acompañamiento y la asistencia técnica hacia los piscicultores de la región
VARIABLES CLAVE	Calidad del agua.
Eje estratégico	Eje 3. Gobernanza local para la gestión del recurso hídrico
Estrategias	3) Gestión local del recurso hídrico
Líneas de acción	1) Conservación y uso sostenible del recurso hídrico
	Crear un gremio de piscicultores que contribuya a la gestión del agua y al desarrollo de la piscicultura

Acciones	Crear espacios de participación comunitaria en la vereda El Naranjal
	Fomentar la cultura ambiental mediante el desarrollo de actividades y capacitaciones ambientales
	Diseñar proyectos de producción agroecológica y ecoturística, con la comunidad indígena y campesina
	Gestionar recursos humanos y financieros para la ejecución de proyectos comunitarios
	Coordinar la ejecución de proyectos entre las instituciones y la comunidad de la vereda.

Las acciones propuestas contribuyen a la aplicación del Código de Conducta para la Pesca Responsable, el cual tiene como propósito, asegurar la conservación, gestión y desarrollo eficaz de los recursos acuáticos (FAO, 1995). Asimismo, las estrategias planteadas están orientadas con base en el ODS 12, correspondiente a la producción y consumo responsable, pues contribuyen a optimizar el sistema productivo mediante la implementación de buenas prácticas de manejo, mejoramiento de la infraestructura y el desarrollo de sistemas productivos mejorados. Estas estrategias viabilizan el desarrollo de una producción más responsable. Vale la pena mencionar que, para la consecución de las acciones propuestas, es importante la participación de todos los actores.

Conclusiones

Abordar el análisis del sistema de producción piscícola desde un enfoque hidrosocial para la gestión del recurso hídrico es una apuesta conceptual sistémica que permite analizar las relaciones sociedad-agua, por lo que se recomienda continuar con este tipo de estudios en las otras veredas dedicadas a la producción de trucha arcoíris (*O. mykiss*), para proponer mecanismos que permitan afrontar los retos ambientales en el Humedal Ramsar Laguna de La Cocha. Conjuntamente, la gestión ambiental para el sector truchícola debe considerarse como una herramienta que, además de contribuir al cuidado del ambiente, mejora la rentabilidad de la producción.

Por otra parte, considerando el gran potencial que posee la acuicultura para responder a los ODS, es necesario desarrollar e implementar sistemas productivos mejorados que permitan la eficiencia de la utilización de los recursos y que contribuyan a cerrar el ciclo de producción de forma sostenible, de manera que aumenten los beneficios no solamente económicos, sino también los sociales y ambientales. Asimismo, es fundamental fortalecer la gobernanza local en los territorios, dado que el cuidado del recurso hídrico de la laguna de La Cocha es una responsabilidad de todos los actores en diferentes escalas, tanto de quienes generan las políticas, como de aquellos que tienen una relación más cercana con los recursos.

Agradecimientos

A Dios, porque sin él nada sería posible; al Centro de Estudios Interdisciplinarios Básicos y Aplicados (Fundación CEIBA), a la Pontificia Universidad Javeriana, al grupo de actores de las diferentes entidades que participaron en el desarrollo de la investigación. Al Dr. Julbrinner Salas Benavides, por su apoyo técnico y logístico en el desarrollo de los talleres. A los piscicultores y a la comunidad de la vereda El Naranjal, especialmente al profesional Oscar Andrés Castro, por su permanente disposición en el desarrollo de la investigación, y a la Editorial UNIMAR por brindarme la oportunidad de difundir conocimiento a través de esta publicación.

Referencias

- Ahmad, A., Sheikh, S. R., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Ismail, N. 'Izzati. (2021). Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. *Journal of Environmental Management*, 287, 11-22. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112271>
- Ahmad, A. L., Chin, J. Y., Mohd, M. H., & Low, S. C. (2022). Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 46, 10-25. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102553>
- Ahmed, N. & Thompson, S. (2019). The blue dimensions of aquaculture: A global synthesis. *Science of the Total Environment*, 652, 851-861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.163>
- Andrade, D. A. y Onassis, H. (2022). *Desarrollo sostenible y oferta exportable de la trucha desde la experiencia de los piscicultores Huarochirí, 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/117322>
- Arcade, J., Godet, M., Meunier, F., & Roubelat, F. (2009). Análisis estructural con el método MICMAC, y estrategia de los actores con el método MACTOR. En J. Glenn & T. Gordon (Eds.), *Futures research methodology* (pp. 165-233). Millennium Project.
- Ardila, L. J. (2022). *Propuesta metodológica basada en estándares internacionales para la sostenibilidad en la gerencia de proyectos del sector pesquero artesanal* [Tesis de pregrado, Universidad Militar Nueva Granada]. <http://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/43845>
- Bartley, D. (2022). *World Aquaculture 2020 – A brief overview*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cb7669en>
- Berkes, F., Colding, J., & Folke, C. (2003). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge University Press.
- Bjørndal, T., Dey, M., & Tusvik, A. (2024). Economic analysis of the contributions of aquaculture to future food security. *Aquaculture*, 578, 71-74. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.740071>
- Boelens, R., Hoogesteger, J., Swyngedouw, E., Vos, J., & Wester, P. (2016). Hydrosocial territories: A political ecology perspective. *Water International*, 41(1), 1-14. <https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1134898>

- Borja, Á. (2002). Los impactos ambientales de la acuicultura y la sostenibilidad de esta actividad. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 18(1-4), 41-49. <https://core.ac.uk/download/pdf/71765141.pdf>
- Boyd, C. E., D'Abramo, L. R., Glencross, B. D., Huyben, D. C., Juarez, L. M., Lockwood, G. S., McNevin, A. A., Tacon, A. G., Teletchea, F., Tomasso, J. R., Tucker, C. S., & Valenti, W. C. (2020). Achieving sustainable aquaculture: Historical and current perspectives and future needs and challenges. *Journal of the World Aquaculture Society*, 51(3), 578-633. <https://doi.org/10.1111/jwas.12714>
- Brugere, C., Bansal, T., Kruijssen, F., & Williams, M. (2023). Humanizing aquaculture development: Putting social and human concerns at the center of future aquaculture development. *Journal of the World Aquaculture Society*, 54(2), 482-526. <https://doi.org/10.1111/jwas.12959>
- Budds, J. (2012). La demanda, evaluación y asignación del agua en el contexto de escasez: Un análisis del ciclo hidrosocial del valle del río La Ligua, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 52, 167-184. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022012000200010>
- Burbano-Gallardo, E., Nivia-Duque, G., Imues-Figueroa, M., González-Legarda, E., Gómez-Delgado, M. y Pantoja-Díaz, J. (2021). Efecto de cultivos piscícolas en los sedimentos y la proliferación de comunidades bacterianas nitrificantes en el lago Guamuez, Colombia. *Ciencia & Tecnología Agropecuaria*, 22(2), 1-15. https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num2_art:1581
- Carballeira, C. B., Cerbule, K., Senff, P., & Stolz, I. K. (2021). Towards environmental sustainability in Marine Finfish Aquaculture. *Frontiers in Marine Science*, 8, 1-24. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.666662>
- Cardozo, G. (2023). *Vinculación sostenible de la acuicultura en la oferta turística del distrito de Iñapari provincia de Tahuamanu región Madre de Dios 2022* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Amazónica de Madre de Dios]. <http://repositorio.unamad.edu.pe/handle/20.500.14070/1010>
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2011). *Plan de Manejo Integral del Humedal Ramsar Laguna de la Cocha*. CORPONARIÑO.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2014). *Capacidad de Carga del Lago Guamués o Laguna de La Cocha del Corregimiento del Encano Municipio de Pasto* [Informe Final]. CORPONARIÑO.
- Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO). (2015). *Resolución 1006 de 2015*. CORPONARIÑO.

- Corporación Autónoma Regional de Nariño CORPONARIÑO. (2018). *Diagnóstico Técnico de las Explotaciones Piscícolas en Jaulas Flotantes Laguna de la Cocha 2016-2019*. CORPONARIÑO.
- Douville, H., Raghavan, K., Renwick, J., Allan, R. P., Gan, T. Y., Gergis, J., Jiang, D., & Khan, A. (2021). Water cycle changes. En C. Péan, S. Berger, N. Caud, & B. Zhou (Eds.), *Cambio climático 2021: La base de la ciencia física* (pp. 1055-1210). Cambridge University Press.
- Einarsson, Á. & Óladóttir, Á. D. (2020). *Fisheries and aquaculture: The food security of the future*. Academic Press.
- Faysse, N., Phiboon, K., & Purotaganon, M. (2022). Which pathway to address interrelated challenges to farm sustainability in Thailand? Views of local actors. *Regional Environmental Change*, 22(1), 11. <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01871-2>
- Fox, C., Hicks, N., Webb, C., Grant, J., Brain, S., Fraser, S., & Abell, R. (2022). *Improving understanding of fish farm organic waste dispersal in higher energy environments*. Scottish Association for Marine Science.
- Garza, J. y Cortez, D. (2011). El uso del método MICMAC y MACTOR análisis prospectivo en un área operativa para la búsqueda de la excelencia operativa a través del Lean Manufacturing. *InnOvaciOnes de NegOciOs*, 8(16), 335-356. <https://doi.org/10.29105/rinn8.16-6>
- Gavrilescu, M. (2021). Water, soil, and plants interactions in a threatened environment. *Water*, 13(19), 27-46. <https://doi.org/10.3390/w13192746>
- Gobernación de Nariño. (2018). *Diagnóstico de producción de trucha en el municipio de Pasto 2018*. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Godet, M. (2007). *Prospectiva Estratégica: Problemas y métodos* (2.^a ed.). PROSPEKTIKER.
- Godet, M. y Durance, P. (2011). La prospectiva estratégica Michael Godet Philippe Durance. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, Ciencia y la Cultura. https://www.academia.edu/12706135/La_prospectiva_estrategica_Michael_Godet_Philippe_Durance
- González, E. A., Burbano, E., Aparicio, R., Duque, G. e Imués, M. A. (2018). Impactos de la acuicultura en los nutrientes del agua y macroinvertebrados bentónicos del Lago Guamez. *Revista MVZ Córdoba*, 23(5), 7035-7047. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1429>

- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (IAvH). (2004). *Proyecto de incentivos para la Laguna de la Cocha como sitio RAMSAR: informe final primera fase* [Reporte]. IAvH. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/18740>
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). (2018). *El Programa de capacitación sobre gestión agroempresarial y asociativa*. IICA.
- Larsimont, R. y Grosso, M. (2014). Aproximación a los nuevos conceptos híbridos para abordar las problemáticas hídricas. *Revista del Departamento de Geografía*, 2(1), 27-48.
- Linton, J. & Budds, J. (2014). The hydrosocial cycle: Defining and mobilizing a relational-dialectical approach to water. *Geoforum*, 57, 170-180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>
- Naspirán-Jojoa, D., Fajardo-Rosero, A. G., Ueno-Fukura, M. y Collazos-Lasso, L. (2022). Perspectivas de una producción sostenible en acuicultura multitrófica integrada (IMTA): Una revisión. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 69(1), 75-97. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v69n1.101539>
- Naylor, R. L., Hardy, R. W., Buschmann, A. H., Bush, S. R., Cao, L., Klinger, D. H., Little, D. C., Lubchenco, J., Shumway, S. E., & Troell, M. (2021). A 20-year retrospective review of global aquaculture. *Nature*, 591(7851), 551-563. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03308-6>
- Orach, K. & Schlüter, M. (2021). Understanding the dynamics of fish politics: The role of diverse actor interactions in transformations towards co-management. *Environmental Science & Policy*, 124, 195-205. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.06.010>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1995). *FAO. Código de conducta para la pesca responsable*. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2011). *Desarrollo de la Acuicultura. 4. Enfoque ecosistémico a la acuicultura*. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2014). *Manual Práctico de Cultivo de Trucha Arcoíris*. FAO.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2018). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2018 (SOFIA): Cumplir los objetivos de desarrollo sostenible*. FAO.

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020: La sostenibilidad en acción*. FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2022). *El estado mundial de la pesca y la acuicultura. Hacia la transformación azul*. FAO. <https://doi.org/10.4060/cc0461es>
- Partelow, S., Schlüter, A., Manlosa, A., Nagel, B., & Octa, A. (2022). Governing aquaculture commons. *Reviews in Aquaculture*, 14(2), 729-750. <https://doi.org/10.1111/raq.12622>
- Pérez, Y. T., Crespo, T. P. y López, R. (2018). Análisis estructural prospectivo sobre la enseñanza de la estadística en las carreras universitarias. *Conrado*, 14(65), 340-349.
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2015). *Vulnerabilidad al cambio climático. Análisis local para el empoderamiento y toma de decisiones*. PNUD.
- Quevedo, M., Acosta, N., & Fold, N. (2022). The role of external forces in the adoption of aquaculture innovations: An ex-ante case study of fish farming in Colombia's southern Amazonian region. *Technological Forecasting and Social Change*, 174, 12-26. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121185>
- Resolución 2184 de 2019. (2019, 26 de diciembre). Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2184-de-2019/>
- Riascos, J., Díaz, D., Beltrán, L. y Gutiérrez, F. (2012). Modelo dinámico para estimar la capacidad de carga de cuerpos de agua con piscicultura. *Revista Actualidad & Divulgación Científica*, 15(1), 135-146. <https://doi.org/10.31910/rudca.v15.n1.2012.811>
- Risk, M. J., Haghshenas, A., & Razavi, A. (2021). Cage aquaculture in the Persian Gulf: A cautionary tale for Iran and the world. *Marine Pollution Bulletin*, 166, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112079>
- Roca-Lanao, B., Mendoza-Ureche, R. y Manjarrés-Martínez, L. (2020). *Análisis de la producción de la acuicultura durante el año 2019 en el área de cobertura de la encuesta estructural desarrollada durante el año 2020*. Autoridad Nacional de Acuicultura y Pesca (AUNAP).

- Salin, K. & Arome, G. (2018). Aquaculture and the environment: Towards sustainability. En F. Hai, C. Visvanathan, & R. Boopathy (Eds.), *Sustainable Aquaculture* (pp. 1-62). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73257-2_1
- Swyngedouw, E. (1999). Modernity and hybridity: Nature, regeneracionismo, and the production of the Spanish waterscape, 1890-1930. *Annals of the Association of American Geographers*, 89(3), 443-465. <https://doi.org/10.1111/0004-5608.00157>
- Tang, Q. (2020). Global change hydrology: Terrestrial water cycle and global change. *Science China Earth Sciences*, 63(3), 459-462. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9559-9>
- Thomas, M., Pasquet, A., Aubin, J., Nahon, S., & Lecocq, T. (2021). When more is more: Taking advantage of species diversity to move towards sustainable aquaculture. *Biological Reviews*, 96(2), 767-784. <https://doi.org/10.1111/brv.12677>
- Vásquez, W., Talavera, M. e Inga, M. (2016). Evaluación del impacto en la calidad de agua debido a la producción semi intensiva de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) en jaulas flotantes en la laguna Arapa—Puno. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 82(1), 15-28. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v82i1.41>
- Villegas, A., Platas, D., Gallardo-López, F. y López-Romero, G. (2020). Análisis estructural MicMac para determinar las variables estratégicas de la agroindustria azucarera en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 11(6), 1325-1335. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i6.2194>
- Yang, D., Yang, Y., & Xia, J. (2021). Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability*, 2(2), 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>

Capítulo 12.

Áreas urbanas en desuso, para implementar educación ambiental y compostaje de residuos orgánicos

Raúl Jiménez Guerrero

Cítese como: Jiménez-Guerrero, R. (2024). Áreas urbanas en desuso, para implementar educación ambiental y compostaje de residuos orgánicos. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 180-187). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c430>

Resumen

El trabajo presenta una serie de espacios evaluados para la implementación de procesos de tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos mediante compostaje, el cual incluye educación ambiental (EA) para incentivar la clasificación de esta desde la generación en las casas de habitación. Contemplar estas dinámicas sociales y de ingeniería en el desarrollo urbano se ha vuelto una necesidad imperante en todos los sitios del globo, que se encamina de manera correcta con los objetivos de desarrollo sostenible. Realizada en la ciudad de San Luis Potosí, México, la trascendencia para esta investigación al incluir este tipo de espacios dentro de la planificación y el desarrollo urbano, es procurar abonar en el saneamiento de las ciudades actuales y del futuro.

Así mismo, en el estudio actual se expresa la evaluación del producto final del compostaje realizado de esta fracción orgánica de residuos en combinación con arbolado urbano, lo que representan juntos casi la mitad de los residuos que una ciudad puede generar diariamente.

Palabras clave: educación ambiental; compostaje; desarrollo urbano

Introducción

El espacio urbano en desuso que presentan las ciudades contemporáneas, son áreas variadas que han llegado a esa situación por distintas razones; estas tienen el potencial para incorporar diversos procesos que coadyuven a la cohesión social y la divulgación de diversos conceptos esenciales para un buen vivir. La EA es un asunto necesariamente importante que debe llevarse en numerosos espacios dentro de las ciudades, para que pueda nutrir a la población circundante con varios temas, así como, brindar los medios y procesos necesarios para que se genere un cambio que beneficie, incluso, a las siguientes generaciones.

La problemática que se aborda en esta investigación es la falta de cohesión que presenta la gestión de los residuos sólidos urbanos y la EA, ya que, a pesar de que existen diversas instituciones que trabajan en esta educación desde hace varias décadas, es poco lo que se ha logrado para concebir transformaciones contundentes de los estilos de vida de las personas, de modo que se vea reducido del impacto ambiental de las ciudades. En este sentido, la educación tiene la función fundamental de informar a la ciudadanía, implicarla, sensibilizarla y hacerla consciente de la necesidad de generar acciones ciudadanas tanto de un consumo responsable de manera individual, como en el colectivo, añadiendo información y los medios que fomenten una solución a las necesidades actuales respecto a los residuos domésticos.

Hablar sobre la gestión de los residuos resulta un tema inagotable para cualquier investigación, debido a las cuantiosas maneras como se puede abordar. Este estudio realiza puntualmente una caracterización de la fracción orgánica que se da en una zona de la ciudad de San Luis Potosí en México, tomando como sujeto de análisis, un centro de EA establecido en ese municipio en el cual, además de los programas educativos que presenta, promueve modelos de gestión y tratamiento de residuos tanto para compostar la fracción orgánica, como de manejo de la fracción inorgánica. De esta manera se evalúa el método con el que se trata este residuo orgánico y el resultado que se obtiene. Paralelamente, se evalúa la percepción social de este proceso de compostaje dentro de la mancha urbana, también como perspectiva respecto a la posibilidad de replicación en otros espacios de la ciudad.

Finalmente, se desarrolla una caracterización de algunos espacios urbanos municipales en desuso para verificar la factibilidad de la aplicación de un modelo que integre la EA y algunos procesos requeridos para el compostaje de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Al ser una evaluación multicarácter, es indispensable considerar las particularidades que la normativa evidencia para el desarrollo urbano de la ciudad y las referencias de carácter operativo establecidas en los manuales de operación de los procesos de compostaje que ya existen en la entidad.

Desarrollo del tema

Contemplar otro desarrollo urbano

Cuando se habla de desarrollo urbano, no se puede pensar simplemente en un crecimiento de la demografía o el área urbanizada, sino que debe considerarse una serie de factores que inciden de manera directa en este, como los factores sociales, políticos, económicos, tecnológicos y otros tantos conceptos que se entranan de manera compleja dentro de lo urbano, para visionar el futuro en las ciudades.

Así que, estas propuestas contemporáneas de desarrollo urbano fungirán como alternativas creativas que vinculen a la ciudadanía con los espacios que habitan, desarrollando nuevas conductas y patrones respecto a nuevas formas o, recuperando prácticas antiguas que funcionaban y que se ha dejado por la modernidad, algunas de las cuales no generaban el impacto ambiental que actualmente conlleva la resolución presente. En este sentido, la Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia y la Cultura (como se cita en Alarcón et al., 2022) estima que, para conservar el medio ambiente y no contaminar el suelo, es urgente retomar las prácticas tradicionales, adaptadas a la actualidad.

Continuando con este rumbo, la serie de normativas de cada localidad indica la manera cómo debe llevarse a cabo el desarrollo urbano y cómo estas están siendo modificadas de manera más armónica con el desarrollo sustentable. Particularmente, para estado de San Luis Potosí, ciudad donde se realiza el estudio, se revisó la ley y el reglamento de ordenamiento territorial y desarrollo urbano, en los cuales se aprecia la compatibilidad urbanística de las áreas que se evaluará para identificar el potencial de uso de suelo con el que se cuenta.

Una educación ambiental para lo cotidiano

En la EA participan diversos conceptos como el desarrollo sostenible, la economía circular, la transición energética, la modernización ecológica, el crecimiento verde y otros tantos; estos se asocian a un conjunto de principios y prácticas que implican la participación de individuos, grupos, pueblos y ciudades, que hacen énfasis en la transformación de los mismos patrones de vida, hacia alguno que nos permita evolucionar, con rumbo a un modelo económico y social que renueve las formas de producir y consumir, de vivir y convivir para afrontar los principales desafíos ambientales que tiene la humanidad. Como mencionan Caride y Meira (2020), sin una EA, será difícil que cualquier transición ecológica, en lo local y lo global, a corto y largo plazo, permita articular el diálogo educación-sociedad-ambiente que abrace los derechos humanos y los derechos ecológicos en la construcción de alternativas ecológicas, pedagógicas, éticas y, socialmente responsables.

Ante esta situación, surge el cuestionamiento: ¿Cómo deberían ser las nuevas propuestas de educación ambiental? para que ofrezcan no solo el contenido teórico-práctico necesario para comprender y sensibilizarse al respecto de la

problemática actual en todos los niveles, sino para lograr inferir directamente en las cotidianidades de las personas. En este momento histórico, Álvarez (2003, como se cita en Martínez, 2010) concibe la EA, “como un proceso de desarrollo socio-cultural continuo de las capacidades que las personas en sociedad deben generar y que se realiza tanto dentro como fuera de su entorno, a lo largo de toda la vida” (p. 99). Esto es fundamental y evita limitar los procesos educativos a momentos efímeros; por el contrario, se debe proponer procesos alternativos incesantes para intentar resolver aspectos comunes en la vida de los individuos al proporcionar los medios indispensables para que estos se den.

Estas futuras propuestas de EA comprometen a las personas que participan en ella, tanto las que la ofrecen, como las que acceden a ella, a cultivar una serie de reflexiones más cercanas, conectadas con el contexto y las relaciones socio-espaciales directas de cada caso. Esto permitirá entender de una manera más clara la problemática ambiental a la cual se enfrenta cada situación y cómo se debe diseñar alternativas a modo de acciones concretas y, la construcción de los medios necesarios para hacerle frente.

Una EA que sea capaz de generar las reflexiones locales y participativas sobre las problemáticas particulares del sitio, no debe quedarse solo ahí; para que genere un impacto positivo y reduzca verdaderamente el impacto ambiental de la vida cotidiana de las personas, es necesario que en estos lugares donde se da el proceso educativo también se genere y ofrezca los medios y procesos activos necesarios, como propuestas posibles a las soluciones alternativas ante dichas problemáticas detectadas.

El asunto de la EA que se queda en la transferencia de información y no presenta alternativas claras ante alguna problemática en particular, ha servido insuficientemente durante estas cinco décadas. Es momento de transformar los procesos educativos, a propuestas activas donde se comparta la información necesaria, se reflexione acerca de las problemáticas ambientales locales y, se promueva nuevos medios y paradigmas para hacerles frente.

La implementación de programas de EA en ciertas zonas que actualmente están en desuso dentro de la mancha urbana, podría volverse un detonador de estas nuevas propuestas educativas-operativas donde los procesos que surgen benefician a la comunidad. Si el proceso educativo que se plantea incluye el equipamiento e infraestructura capaz de abonar a nuevas prácticas y estilos de vida distintos, entonces la ciudad podría ir transformando tanto su morfología como sus procesos sociales hacia un devenir más armónico.

Integrando la gestión residuos en el desarrollo urbano

El paradigma actual de los residuos está en una etapa de cambio respecto a su entendimiento, tanto por parte de las instituciones que trabajan en ello, ya sean públicas o privadas, como en la ciudadanía en general. Ante esto se está realizando

una serie de legislaciones nuevas que conlleven una mejor comprensión de la situación y cómo poder mitigar los impactos que esta ocasiona. Se pretende que no solamente se realice un manejo de los residuos en todas las escalas y momentos de estos, sino que se abarque el concepto de la gestión, lo que implica un involucramiento mayor por parte de todos los actores, las geografías, las leyes y normativas y la sociedad participativa (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020).

En México, se estima que la generación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) es de 120.128 toneladas por día, de los cuales el 46,42 % está constituido por la fracción orgánica; y, solamente en 144 de los 2.469 municipios de la república se realiza una recolección segregada (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2020). En 2020 fueron registradas simplemente 19 instalaciones para el tratamiento de la fracción orgánica de estos residuos en el territorio mexicano, registrando un total de 2.062 toneladas diarias en estos sitios. Por esto, la separación, acopio y tratamiento adecuado de ellos representa oportunidades en el ámbito económico, social y ambiental que las administraciones gubernamentales deben plantearse para lograr gestionar de forma integral los residuos.

De igual manera, es fundamental considerar la normativa establecida para el manejo adecuado de residuos, ya que esta nos indica las formas y posibilidades espaciales, técnicas y administrativas para una buena gestión. La relevancia que esto toma dentro de la investigación es por la necesidad de sumar equipamiento y dar continuidad a las propuestas que se ha venido generando en este sentido, tanto en la legislación como en la implementación de medios de contención ante la problemática, particularizando en los métodos de tratamiento que puede darse a la fracción orgánica de los residuos e introducirse como indicadores de desarrollo urbano con énfasis en la regeneración urbana.

Identificación de los sectores

Debido a la gran problemática que los residuos representan y la oportunidad que la EA brinda desde esta nueva perspectiva, buscar los espacios adecuados para el establecimiento de estos procesos, es una labor que puede llevar a la implementación de distintos modelos que propongan acciones concretas para aminorarla.

Dependiendo de la morfología urbana y del cumplimiento de las características correspondientes a la normativa que precisa este proceso de compostaje, para México es la NMX-AA-180SCFI-2018, que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los RSU y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales.

Se requiere considerar el proceso de selección sobre una serie de espacios municipales en desuso con las características que la normativa determina, el tipo de manzana adecuado, el estilo de tejido urbano, área adecuada, densidad

poblacional, vías de acceso y la distancia obligatoria a viviendas, mediante una tabla de correlación; esto permite crear una estratificación de zonas urbanas potenciales para ser ocupadas con esta combinación de procesos entre EA y tratamiento de la fracción orgánica mediante compostaje.

El otro sector de este estudio contempla la perspectiva que la sociedad tiene respecto a estos procesos que, siendo muy distintos, parece que en ambos existe bastante desinformación o desconocimiento; primero, en cuanto a la EA, la mayor parte de los participantes manifiesta conocer que existe una problemática ambiental en el contexto, pero que desconocen con precisión las causas y, sobre todo, cómo enfrentar la situación. Cuando se plantea la posibilidad de dar tratamiento a esta fracción orgánica de los residuos, la mayoría adopta una actitud aprobatoria y, aunque existe desconocimiento de cómo se efectúa este proceso, comentan que podría ser una buena manera de aminorar la problemática que representa en las ciudades. Resulta que más de la mitad estaría dispuesto a colaborar con esto, mediante la clasificación de sus residuos desde la generación en casa, pero manifiestan que les gustaría que fueran recogidos ahí mismo; y, la otra fracción también los clasificaría, pero, además, podría disponerlos directamente en el sitio de tratamiento.

Resultados

El compostaje de la fracción orgánica de RSU en combinación con el arbolado urbano, ciertamente evidencia una oportunidad para sanear las ciudades. Esta combinación representa más del 40 % de los residuos generados en la ciudad y, tiene potencial para ser aprovechable con este método. El resultado del compostaje pudo evaluarse en el laboratorio para conocer los contenidos precisos al final del tratamiento, como se puede apreciar en la Tabla 1. Este sustrato se presenta bastante balanceado y nutrido y no evidencia grado de toxicidad, para ser aprovechado en áreas verdes, así como, para nutrir suelos de producción agrícola.

Tabla 1

Características generales de la composición orgánica de la composta de RSU y arbolado urbano

Características generales de la Composta						
N	P	K	PH	Humedad	Temperatura	EC
18	26	54	7	20	25 °C	305
39	56	112	7.47	22.4	26 °C	578
40	57	116	6.63	21.2	26,4 °C	589
40	56	113	6.75	26.3	26,8 °C	573

Nota. Datos derivados del Laboratorio de Egroecología de la Universidad Autónoma San Luis de Potosí (UASLP). El resultado está dado en partes por millón.

Así, se demuestra la viabilidad del proceso de compostaje de RSU y arbolado urbano, sirviendo como pauta para dar salida a la problemática ambiental que estos residuos pueden generar si su clasificación y disposición final no es correcta.

En la parte urbana de la investigación se determinó tres espacios factibles para la incorporación de estos procesos, los cuales cumplen con las pautas que indica la normativa y las características urbano espaciales necesarias para fungir sin ninguna problemática. Estos se encuentran en las siguientes direcciones: Avenida Arco # 545, en el fraccionamiento Olinda Duis, Benigno Arriaga #144, El Patio y en la Base Centauro de la Policía Municipal Norte.

Estos espacios identificados son propiedad de la administración municipal, lo que les confiere una capacidad de ocupación alta y, posibilidad de ser equipados con lo necesario mediante el financiamiento requerido por parte de esta administración.

Conclusiones

Contemplar los espacios precisos para el tratamiento de la fracción orgánica de los RSU dentro del desarrollo urbano es, sin duda, una necesidad que deben plantearse las nuevas ciudades que se vaya a fundar y, la búsqueda de vacíos urbanos para identificar cuáles de estos sitios en desuso tienen el potencial y cumplen con las características indicadas para llevar a cabo este proceso que, puede beneficiar a la ciudad completa evitando la mala disposición de los residuos.

Es importante comprender que, para que este proceso pueda funcionar realmente, es ineludible incluir programas de EA que fomenten en la población circundante, los conceptos y las buenas formas para la clasificación de los residuos, desde su generación en casa y la sensibilidad requerida para contribuir con cambios hacia las soluciones de esta problemática, ya que sin una buena y profunda educación ambiental, no se incrementará la cultura de responsabilidad necesaria hacia los residuos.

Referencias

- Alarcón, A. S., Durand, M. E., Guerrero, A., Gutiérrez, A. M. y Rodríguez, Y. (2022). Cultura ambiental en desarrollo urbano: Revisión sistemática de la literatura. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), 830-852. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.3573
- Álvarez, A. (2003). Memorias del III Congreso Iberoamericano de Educación Ambiental. Caracas, Venezuela: Fundación polar.
- Caride, J. A. y Meira, P. A. (2020). La educación ambiental en los límites, o la necesidad cívica y pedagógica de respuestas a una civilización que colapsa. *Pedagogía Social, Revista Interuniversitaria*, (36), 21-34. https://doi.org/10.7179/PSRI_2020.36.01
- Martínez, R. (2010). La importancia de la educación ambiental ante la problemática actual. *Revista Electrónica Educare*, 14(1), 97-111. <https://doi.org/10.15359/ree.14-1.9>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>

Capítulo 13.

Análisis de las características socioeconómicas y su importancia en los procesos de restauración ecológica en el humedal Ramsar La Cocha

Sandra Milena Madroñero Palacios¹

Diego Andrés Muñoz Guerrero²

Jorge Alberto Vélez Lozano³

Cítese como: Madroñero-Palacios, S. M., Muñoz-Guerrero, D. A. y Vélez-Lozano, J. A. (2024). Análisis de las características socioeconómicas y su importancia en los procesos de restauración ecológica en el humedal Ramsar La Cocha. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 188-197). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c431>

Resumen

El estudio se centró en analizar las características socioeconómicas y su relación con la restauración ecológica en el humedal Ramsar La Cocha, ubicado en la Laguna de La Cocha en Pasto, Colombia. El objetivo principal fue entender cómo las dinámicas socioeconómicas afectan la cobertura del suelo y la conservación del humedal. Se aplicó 100 encuestas semiestructuradas en las veredas con mayor densidad poblacional, explorando aspectos como: ingresos, actividades económicas y percepciones sobre la conservación ambiental. La metodología incluyó técnicas de minería de datos y análisis de textos para procesar las encuestas y entrevistas. Se utilizó un enfoque multidisciplinario que integró análisis estadísticos y minería de datos para identificar patrones y tendencias en las dinámicas socioeconómicas del área de estudio. Los principales resultados indicaron que, actividades agrícolas y ganaderas han contribuido significativamente a la deforestación y pérdida de cobertura vegetal en el humedal. No obstante, se evidenció un creciente

¹ Doctoranda en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Instituto Tecnológico de Costa Rica, Universidad Nacional, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica. Profesora Asistente. Universidad Mariana, Programa de Ingeniería Ambiental. Pasto, Colombia.

² Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Departamento de Recursos Naturales y Sistemas Agroforestales. Colombia.

³ Universidad de Nariño, Facultad de Ciencias Agrícolas, Departamento de Recursos Naturales y Sistemas Agroforestales. Colombia.

interés local por la conservación ambiental, aunque persisten desafíos como la sobreexplotación de recursos forestales y prácticas agrícolas intensivas. Estos hallazgos subrayan la necesidad de estrategias sostenibles que promuevan un equilibrio entre el desarrollo económico y la conservación ambiental para asegurar la sostenibilidad del humedal Ramsar La Cocha.

Palabras clave: Ramsar; minería de datos; restauración; características socioeconómicas

Introducción

El humedal Ramsar La Cocha, situado en la Laguna de La Cocha en Pasto, Colombia, es un ecosistema de gran importancia tanto por su biodiversidad como por su relevancia socioeconómica para las comunidades locales. Este artículo se enfoca en el análisis de las características socioeconómicas y su relación con los procesos de restauración ecológica en este humedal; para ello, se llevó a cabo 100 encuestas semiestructuradas en las veredas con mayor densidad poblacional del área de estudio.

El estudio aborda la interacción entre las dinámicas de la cobertura del suelo del humedal Ramsar La Cocha y la conservación de áreas naturales, así como su impacto en las comunidades locales. Esta investigación es esencial debido a la urgente necesidad de comprender las complejas relaciones entre los cambios ambientales y sus efectos socioeconómicos en humedales críticos como este; busca proporcionar perspectivas valiosas para la gestión sostenible y la conservación de humedales, subrayando la importancia de un enfoque integrador que considere tanto aspectos ecológicos como socioeconómicos en las decisiones sobre el uso del suelo.

La pregunta de investigación que guía este análisis es: ¿Cuáles son las características socioeconómicas y cuál es su importancia en los procesos de restauración en el humedal Ramsar La Cocha? La comprensión de estas dinámicas es fundamental para establecer un marco adecuado que promueva estrategias de manejo equilibradas, favoreciendo la conservación ambiental y el desarrollo socioeconómico sostenible en la región.

Para abordar este interrogante se adopta un enfoque metodológico que integra técnicas avanzadas de minería de datos y análisis de textos. A través de entrevistas semiestructuradas y encuestas se explora las dinámicas socioeconómicas que influyen en la cobertura terrestre del humedal, capturando las percepciones y actitudes de las comunidades locales frente a estos cambios.

Los resultados preliminares revelan que las transformaciones socioeconómicas, especialmente en las actividades agrícolas y ganaderas, han tenido un impacto significativo en la deforestación y la pérdida de coberturas vegetales dentro del humedal. Este hallazgo destaca la necesidad urgente de implementar estrategias sostenibles que reconcilien el desarrollo económico con la conservación ambiental y el bienestar de las comunidades locales.

Asimismo, se observa un creciente interés por la conservación ambiental y una mayor conciencia sobre los impactos sociales relacionados con el uso del suelo. Sin embargo, persisten desafíos como la deforestación y proyectos productivos que generan preocupaciones en la comunidad respecto a los cambios ocurridos en la última década.

En resumen, este estudio contribuye significativamente al conocimiento sobre las interacciones entre transformaciones socioeconómicas y cambios en la cobertura del suelo en humedales críticos como La Cocha. Además, proporciona evidencia empírica que respalda la importancia de integrar consideraciones socioeconómicas en las estrategias de gestión para asegurar la sostenibilidad a largo plazo de estos ecosistemas vitales.

Desarrollo del tema

Recopilación de datos socioeconómicos

Se aplicó 100 encuestas semiestructuradas a la población presente en las veredas de El Encano centro, Santa Teresita, Romerillo, Ramos, El Puerto, Santa Clara, Casapamba, Mojondinoy, Carrizo y San José, que fueron seleccionadas debido a la mayor densidad poblacional en el área (Figura 1). Las temáticas abordadas en las encuestas incluyeron características familiares o demográficas y aspectos socioeconómicos como: ingresos, actividades económicas o laborales, actividad productiva, nivel educativo y actividades de restauración desarrolladas.

de datos para identificar patrones y tendencias; se partió de un preprocesamiento usando el método *Average* para variables continuas y *Most Frequent* para las categóricas, así como, la detección de *outliers* mediante el método *Local Outlier Factor*, según recomendaciones de la literatura técnica para este tipo de datos (García et al., 2015).

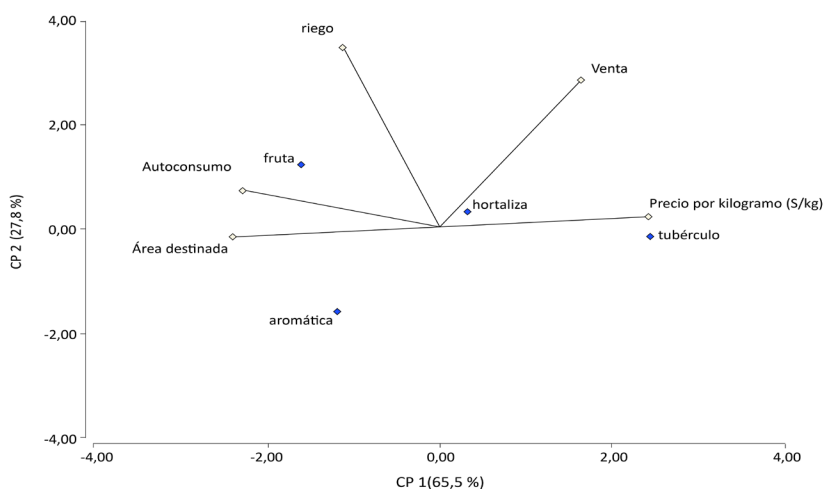
Posteriormente, se hizo un Análisis de Componentes Principales (ACP) para cada categoría principal; esta es una técnica que simplifica conjuntos de datos complejos con muchas variables. Su objetivo es representar la información original en gráficos más simples, manteniendo la mayor cantidad posible de información importante.

Resultados

Los resultados permitieron establecer las relaciones existentes, sean positivas o negativas, de las variables socioeconómicas estudiadas en el área de estudio. En la Figura 2 se observa el comportamiento de las variables relacionadas con la actividad agropecuaria. De esto se puede establecer que el autoconsumo se correlaciona negativamente con el riego, lo que sugiere que las familias que tienen sus cultivos con fines de autoabastecimiento, tienden a no utilizar sistemas de riego; esto se puede ver influenciado porque las áreas destinadas para autoconsumo son pequeñas huertas caseras que pueden mantener de forma natural, siendo esenciales, ya que se convierten en una estrategia para la sostenibilidad ambiental y el mantenimiento de la seguridad alimentaria (Moreno et al., 2019).

Figura 2

Análisis de Componentes Principales (ACP) de los datos relacionados con la actividad agrícola



Por otro lado, la venta de productos se correlaciona positivamente con el precio por kilogramo y la producción de cultivos agrícolas no permanentes, como tubérculos y hortalizas, indicando que estos cultivos en la zona son destinados principalmente a la comercialización. No obstante, se observa que la etiqueta 'Hortaliza', ubicada cerca del origen en el gráfico, podría sugerir que dichos cultivos son destinados tanto para el autoconsumo como para la venta, debido a la amplia demanda que tienen estos productos, entre los cuales se identifica a la papa, la lechuga, el repollo, la alverja, las fresas, la cebolla, entre otros (Luna y Madroñero, 2016) y, a los patrones culturales de producción que han sido heredados familiarmente, siendo los productos agrícolas que más se produce y comercializa. Finalmente, en lo relacionado con la producción de aromáticas y frutas, se hace fundamental mencionar que no posee relevancia, ya que se cultiva de manera incipiente para la preparación de dulces que son comercializados a los turistas, en menor cantidad.

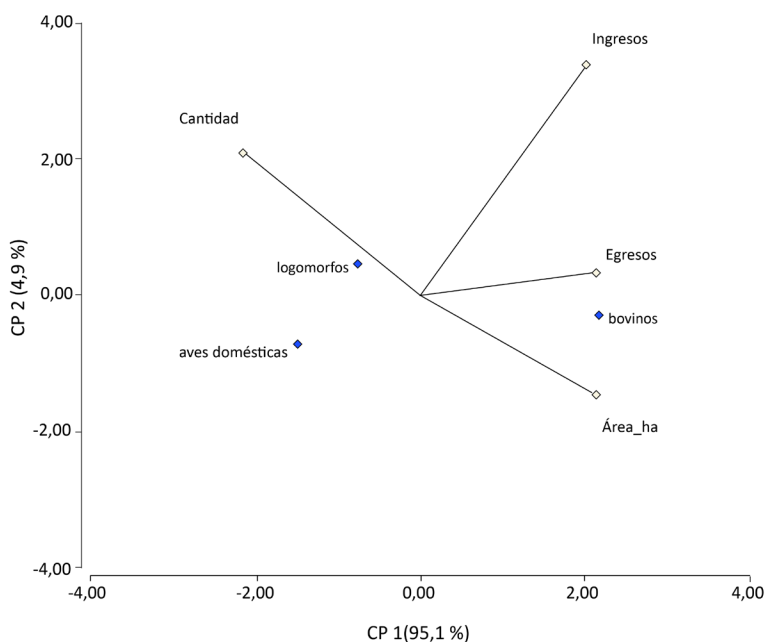
De lo anterior, se puede establecer que la siembra de cultivos no permanentes, principalmente la papa, aumenta la presión en la transformación de las áreas de conservación del humedal Ramsar, no solo por los procesos de ampliación de la frontera agrícola, sino, además, a un posible incremento en el uso de agroquímicos y prácticas de cultivo intensivas (Tulcán, 2023), trayendo como consecuencia, contaminación de recursos como agua y suelo y, pérdida de biodiversidad, entre otros (Jurado, 2021). De allí la necesidad de desarrollar procesos orientados a implementar prácticas agrícolas sostenibles que minimicen estos impactos para preservar la integridad ecológica del humedal.

Por su parte, las prácticas pecuarias asociadas con la distribución de la actividad por especies, podrían tener un impacto significativo. La tendencia a diversificar el uso de la tierra, especialmente hacia la cría de especies menores como cuyes y conejos, podría implicar cambios en el uso del suelo, que afecten la biodiversidad y la calidad del agua del humedal. La expansión de áreas dedicadas a la cría de diferentes especies, especialmente si implica intensificación o cambios en el uso del suelo, podría incrementar la presión sobre el humedal.

Otro de los aspectos evaluados tiene que ver con la actividad pecuaria; en la Figura 3 se presenta un ACP en el que se relaciona la actividad pecuaria con la distribución de la actividad por especies. El primer componente principal (CP 1), que abarca el 95,1 % de la variabilidad, muestra una fuerte asociación entre 'Ingresos' y 'Egresos', reflejando una relación directa y, probablemente proporcional, entre la entrada y salida de recursos económicos en la actividad pecuaria. Debido a que el comportamiento del mercado rural en la zona se mueve en función de estas dos variables, esto indica que la economía de la operación es dinámica, con los ingresos y egresos vinculados estrechamente, debido posiblemente a inversiones en la producción y el mantenimiento de los animales (Bastidas, 2020)

Figura 3

Análisis de Componentes Principales (ACP) de los datos relacionados con la distribución de la actividad pecuaria por especies



En contraste, la orientación opuesta del vector 'Área_ha' y la etiqueta 'Bovinos', sugiere una tendencia: a medida que incrementa el área dedicada a la actividad pecuaria, puede haber una reducción en la cantidad de bovinos. Esto podría interpretarse como una diversificación en el uso de la tierra, donde más hectáreas no necesariamente se traducen en más vacas, sino que podrían estar siendo utilizadas para otras prácticas como la cría de especies menores como conejos, cuyes -lagomorfos- o, que los patrones de producción pueden estar orientados a desarrollar ganadería extensiva.

Por su parte, el segundo componente principal (CP 2), representa un menor porcentaje de la variabilidad (4,9 %), sugiriendo que las variaciones en la cantidad de animales están vinculadas con la cría de estas especies menores: cuyes, conejos. La posición de 'Aves domésticas' lejos del centro, indica que esta variable podría representar una actividad diferenciada, con características propias que la distinguen en el contexto del estudio, como una especialización dentro de la actividad pecuaria. De allí, que la cría de cuyes, conejos y gallinas tiene, principalmente, una finalidad de autoconsumo y no de comercialización.

En la Figura 4 se presenta un ACP de los datos relacionados con la distribución de la actividad forestal por tipo de aprovechamiento. Si toda la explotación de especies forestales en el humedal Ramsar se destina al uso individual de las familias que lo habitan, se observa que el uso de la madera como leña, no está influenciado

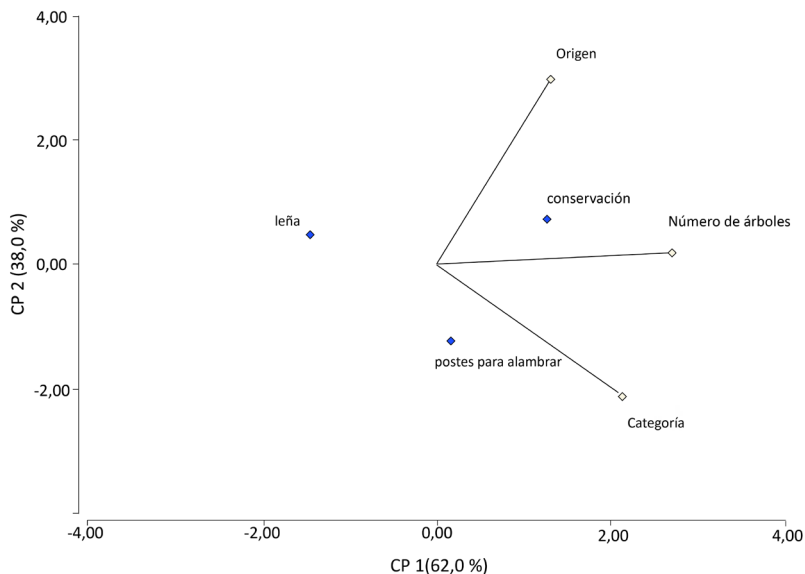
por el origen de la especie, el número de árboles o la categoría, ya sea madera dura, de crecimiento rápido, ornamental u otra.

Esta falta de discriminación en la selección de la especie para la obtención de leña podría tener un impacto negativo en el humedal. Por otro lado, el tipo de aprovechamiento con fines de conservación está asociado al número de árboles, lo que sugiere que la decisión de conservar o no, depende de la cantidad de árboles presentes en la zona. Finalmente, dependiendo de si las especies forestales son madera dura, de crecimiento rápido, ornamentales u otras, son utilizadas como postes para cercas, alambradas o, para la elaboración de carbón vegetal, actividad que, a pesar de los años y estrategias desarrolladas por las entidades gubernamentales, no se ha logrado eliminar por completo, ya que se convierte en una estrategia de obtención de recursos.

Bajo este escenario, una de las principales observaciones es la extracción indiscriminada de leña como combustible, sin consideración del origen de las especies, su abundancia o categoría. Este enfoque podría conducir a la sobreexplotación de ciertas poblaciones de árboles, alterando la composición y estructura de los bosques del humedal.

Figura 4

Análisis de Componentes Principales (ACP) de los datos relacionados con la distribución de la actividad forestal por tipo de aprovechamiento



Además, las prácticas de conservación están estrechamente vinculadas al número de individuos de determinadas especies, lo que sugiere un enfoque sesgado hacia las poblaciones más abundantes. Esta estrategia podría dejar desatendidas a las especies menos comunes, aumentando su riesgo de extinción local.

Por otro lado, la selección de especies para la obtención de postes y cercas se basa en características como la dureza de la madera, la tasa de crecimiento y el uso ornamental. Si bien este enfoque puede ser eficiente desde el punto de vista económico, también podría llevar a la sobreexplotación de ciertas especies más adecuadas para este fin.

Estos patrones de aprovechamiento individual de los recursos forestales por parte de las comunidades locales representan una amenaza significativa para la integridad ecológica del humedal Ramsar de La Cocha. La extracción descontrolada de leña, el sesgo hacia especies abundantes en las prácticas de conservación y la sobreexplotación selectiva de ciertas especies para postes y cercas podrían desencadenar la degradación del hábitat, la pérdida de biodiversidad y la alteración de los servicios ecosistémicos que brinda este humedal.

Conclusiones

La siembra de cultivos no permanentes, especialmente la papa, aumenta la presión sobre las áreas de conservación del humedal Ramsar; esto no solo se debe a la expansión de la frontera agrícola, sino al incremento en el uso de agroquímicos y prácticas de cultivo intensivas, lo que puede llevar a la contaminación del agua y el suelo y, a la pérdida de biodiversidad.

La diversificación de la actividad pecuaria, especialmente hacia la cría de especies menores como cuyes y conejos, puede implicar cambios en el uso del suelo que afecten la biodiversidad y la calidad del agua del humedal.

La explotación indiscriminada de leña, sin consideración del origen de las especies forestales y la cantidad de árboles presentes en el humedal Ramsar, puede llevar a la sobreexplotación de ciertas especies y alterar la composición y estructura del bosque.

El estudio de las características socioeconómicas es esencial para comprender las transformaciones del paisaje en áreas rurales. Estas características revelan cómo las prácticas agrícolas y pecuarias, impulsadas por necesidades y decisiones económicas, afectan el uso del suelo y los ecosistemas locales.

Al analizar las relaciones entre factores como el autoconsumo, la comercialización de productos y la diversificación de actividades pecuarias, se puede entender mejor cómo las acciones humanas remodelan el paisaje. Esta comprensión es crucial para desarrollar estrategias que mitiguen los impactos negativos sobre el medio ambiente, promoviendo prácticas sostenibles que preserven la integridad ecológica y la biodiversidad de los paisajes rurales.

Referencias

- Backhaus, K., Erichson, B., Gensler, S., Weiber, R., & Weiber, T. (2021). *Multivariate analysis: An application-oriented introduction*. Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32589-3>
- Bastidas, E. J. (2020). Alternativas económicas que permitan la conservación del ambiente para los habitantes del corregimiento de El Encano. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales y Humanas*, 11(1), 58-68. <https://doi.org/10.15658/INVESTIGIUMIRE.201101.05>
- García, S., Luengo, J., & Herrera, F. (2015). *Data Preprocessing in Data Mining*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-10247-4>
- Jurado, O. J. (2021). *Estrategias ecopedagógicas para disminuir el daño ambiental por la acción antrópica en el corregimiento del Encanto, municipio de Pasto, departamento de Nariño* [Tesis de Maestría, Universidad de Manizales]. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/4796>
- Luna, S. y Madroñero, S. (2016). Importancia del componente social en el manejo del recurso hídrico, río El Encano, Humedal Ramsar La Cocha (Nariño, Colombia). *Luna Azul*, 42, 200-216. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.42.13>
- Moreno, N., González, A., Medina, J., Rodríguez, J. y Cisneros, C. (2019). Huertas caseras como una opción de sostenibilidad socio-ambiental. *Cultura, Educación, Sociedad*, 10(2), 37-46. <https://doi.org/10.17981/cultedusoc.10.2.2019.03>
- Tulcán, J. R. (2023). *Análisis del cambio de cobertura vegetal y proyección futura en la parroquia Angochagua* [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14286>

Capítulo 14.

Evaluación del efecto de la aplicación de bioles y hongos micorrízicos arbusculares en *Helianthus annuus* para la biorremediación de suelos contaminados con zinc

Valeria Jurkauskas Campuzano¹

Andrea Tamayo Londoño²

Laura Osorno Bedoya³

Cítese como: Jurkauskas-Campuzano, V., Tamayo-Londoño, A. y Osorno-Bedoya, L. (2024). Evaluación del efecto de la aplicación de bioles y hongos micorrízicos arbusculares en *Helianthus annuus* para la biorremediación de suelos contaminados con zinc. En J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 198-209). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c432>

Resumen

El zinc es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Sin embargo, en altas concentraciones llega a ser tóxico, afectando negativamente a la planta y al suelo. Una de las alternativas para disminuir la concentración de este elemento en los suelos es la biorremediación, en la cual se puede utilizar plantas hiperacumuladoras de metales y microorganismos como los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la biorremediación de suelos contaminados con Zinc por *Helianthus annuus* con adición de bioles e inoculación con HMA.

El experimento se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero por 90 días en un suelo con una concentración de 500 mg de Zinc /Kg. Los tratamientos consistieron en la inoculación o no de HMA y la adición de bioles como fertilizantes orgánicos. Los resultados muestran que las plantas de girasol lograron crecer en el suelo con 500 mg/Kg; su desarrollo fue significativamente mayor cuando fueron inoculadas con el hongo con una biomasa aérea de 28.11 g radicular 33.4 g comparada con

¹ Ingeniera Ambiental, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. jurkauskasvale2302@gmail.com

² Magíster en Medio ambiente y desarrollo. Ingeniera Biológica. Docente, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, andrea.tamayo@colmayor.edu.co

³ Doctora en Biotecnología. Magíster en Ciencias del suelo. Ingeniera Biológica. Docente, Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Laura.osorno@colmayo.edu.co

los controles no inoculados 20.7 g y 25.3 g respectivamente y, presentaron una colonización micorrizal del 30 %.

Al final del experimento, la concentración de Zinc en el suelo disminuyó en un 99,2 % con las plantas no inoculadas y, al inocularlas con los HMA, en un 99,6 %. La planta de girasol es una alternativa ambientalmente sostenible y estética para biorremediar suelos contaminados con metales; los HMA mejoran la biorremediación y el desarrollo de las plantas en presencia de metales.

Palabras clave: contaminación; girasol; metales pesados; micorrizas; zinc

Introducción

El zinc (Zn) es un micronutriente esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Alloway, 2008); actúa como estabilizador de las estructuras de proteínas (Broadley et al., 2007); es cofactor para activación de enzimas involucradas en procesos metabólicos (Lin y Aarts, 2012), además de ser indispensable para el proceso de fotosíntesis (Amezcuca y Lara, 2017). La concentración en el suelo está entre 15 a 20 mgkg⁻¹; sin embargo, si esta excede los 200 mgkg⁻¹, se convierte en tóxico para las plantas y los organismos, provocando una alteración en la biodiversidad del suelo (Shettyfl et al., 1995; Schulte, 2004), reducción de materia orgánica y su capacidad de actuar como filtro (Hamzah Saleem et al., 2022). El exceso de Zn puede provocar un desequilibrio de nutrientes en el suelo (Ariza y Pinzón, 2022), inhibir la función de otros elementos esenciales como el fósforo (P), hierro (Fe), cobre (Cu) y magnesio (Mg) (Sinclair y Krämer, 2012), provocando una disminución en sus frutos y semillas, un crecimiento atrofiado y un color amarillento en las hojas (Amezcuca y Lara, 2017), induciendo una inhibición de la fijación de dióxido de carbono (CO₂), afectando el transporte de los hidratos de carbono en el floema y, alterando la permeabilidad de la membrana celular (Ramírez, 2005).

La contaminación por Zn en el suelo se da por diferentes usos; es empleado en aleaciones de bronce y latón, pintura, galvanizados, cosméticos, medicinas, agroquímicos; también, se encuentra en algunos fungicidas (Cañizares-Villanueva, 2000); además, en el suelo puede estar acompañado de otros metales pesados como arsénico, cadmio, cromo, plomo, hierro y níquel por actividades de minería, refinerías y fundiciones (Casierra-Posada y Poveda, 2005).

Una alternativa para la rehabilitación de suelos contaminados con Zn es la biorremediación (Wei et al., 2021), que consiste en el uso de microorganismos, enzimas o plantas con capacidad de acumular o inmovilizar el contaminante que se encuentra en el suelo (Ortiz et al., 2007). Esta técnica tiene múltiples ventajas con respecto a las estrategias químicas y físicas: es de bajo costo, no genera otras formas químicas tóxicas, mejora el flujo de agua en el perfil del suelo (Bernal et

al., 2007), favorece la aireación del suelo y, se puede hacer para descontaminar grandes cantidades de suelo en el menor tiempo posible (Velásquez, 2017).

Entre las plantas que se ha reportado como hiperacumuladoras de Zn, se encuentra el girasol; este ha sido estudiado por la inclusión de genes de especies silvestres que lo hacen más tolerante a metales pesados y, por su capacidad radicular para hiperacumular metales (Gutiérrez-Espinoza et al., 2005). Tiene la capacidad de acumular metales a niveles de 100 veces más que aquellos que son medidos típicamente en plantas no acumuladoras; una planta hiperacumuladora de zinc puede acumular aproximadamente 10.000 µg por g de zinc (Grandez, 2017).

La asociación 'planta-microorganismo' (González y Fuentes, 2017) es uno de los tratamientos usados en biorremediación. Uno de los microorganismos del suelo más usados en la agricultura y en la descontaminación son los HMA, los cuales forman una simbiosis con las raíces de la planta (Wei et al., 2021). Esta asociación le permite a la planta tener la capacidad de tolerar y acumular contaminación por metales (Garbisu et al., 2008) y, mejorar su tasa de supervivencia en concertaciones tóxicas (Royo et al., 1997). Desde el punto de vista nutricional, estos hongos absorben nutrientes como N, P, K, Ca, S, Fe, Mn, Cu y Zn del suelo y luego los trasladan a la planta (Wang et al., 2016), por medio de absorción, translocación y transferencia (Munive et al., 2020). Las plantas de girasol presentan asociación micorrizal con especies como *Rhizophagus intraradices*, *Funneliformis mosseae*, (Vital-Vilchis et al., 2020). Varios autores han reportado investigaciones para biorremediación de metales como plomo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), mercurio (Hg) y Zn (Fajardo, 2017).

Por otro lado, en procesos de biodigestión anaerobia, se obtiene un producto denominado biol, el cual se ha utilizado como fertilizante orgánico, con una alta concentración de nutrientes en forma biodisponible como el N (Vega et al., 2020, Gielnik et al., 2019) y bajo nivel de carbono fácilmente degradable. El biol o digestato contiene varios nutrientes, como N, P y K; por lo tanto, tiene el potencial de promover el crecimiento de las plantas (Yan et al., 2023).

Este proyecto busca evaluar el efecto de la biorremediación de suelos contaminados con Zn con plantas de girasol inoculadas con HMA fertilizados con bioles.

Materiales y métodos

Caracterización del suelo

La muestra de suelo corresponde a un Andisol de la finca El Reencuentro, ubicada en el Retiro, Antioquia. El área fue seleccionada al azar; se tomó una muestra del horizonte A, en una profundidad de 0-20 cm; se secó a temperatura ambiente (28-30 °C) durante diez días; se pasó por un tamiz de 2 mm y se sirvió en macetas de 1000 g de capacidad.

Para el análisis fisicoquímico se tomó una muestra del suelo, a la que se le midió los parámetros de pH y conductividad eléctrica; se utilizó el protocolo estandarizado para análisis del suelo de Borrero et al. (2017).

Planta

Se utilizó semillas de girasol (*Helianthus annuus*), que fueron germinadas en cámara húmeda durante tres días. Se sembró tres semillas germinadas en cada una de las macetas. Después de 15 días de crecimiento, se realizó un raleo para dejar una sola planta. Las plantas fueron regadas con agua y solución nutritiva Hoagland (Llanos, 2001) libre de Zinc.

El experimento se realizó en el invernadero de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia.

Contaminante

El contaminante que se utilizó es Zinc; para esto se preparó una solución de $ZnSO_4$ a una concentración de 500 mg Zn/Kg suelo seco.

Tratamientos

Se usó el hongo micorrízico arbuscular (HMA) *Rhizophagus fasciculatum* de la empresa Biofertilizar SAS., con una concentración de 400 esporas/g y se infundió 45 g de inóculo por cada kilogramo de suelo.

El biol fue una muestra comercial: Fertile, de la empresa Terrazonet, con una conductividad de 0,95 dS/m y una relación C/N 1.4. Se adicionó 45 ml de biol de acuerdo con la recomendación del fabricante.

Diseño experimental

El montaje del experimento consistió en la realización de tres tratamientos inoculados o no con HMA y la aplicación o no del biol y un control no inoculado. Cada tratamiento tuvo tres repeticiones.

Variables

Para el seguimiento del experimento se realizó un riego diario de acuerdo con la capacidad de campo del suelo. Después de 60 días de crecimiento, se evaluó las variables biométricas en las plantas, como: altura (cm), diámetro (mm) y número de hojas, concentración de Zn foliar (%), concentración de Zn en el suelo (ppm) (Pérez y Alvarado, 2018), biomasa área y radicular (g) y colonización micorrizal (%).

Prueba de significancia estadística

Al finalizar, se realizó un ANOVA y una prueba de diferencias de medias por Duncan para determinar las diferencias estadísticas significativas con un $p < 0.5$, en el software Sthatchgraphics Centurion XV.

Resultados y Discusión

Caracterización físico-química del suelo

El análisis fisicoquímico del suelo arrojó un pH de 5.3 y CE 204.5 $\mu\text{s}/\text{cm}$, lo que indica un suelo ácido, con presencia de aluminio (FAO, 2023), por lo que se encaló con carbonato de calcio para neutralizar el Al.

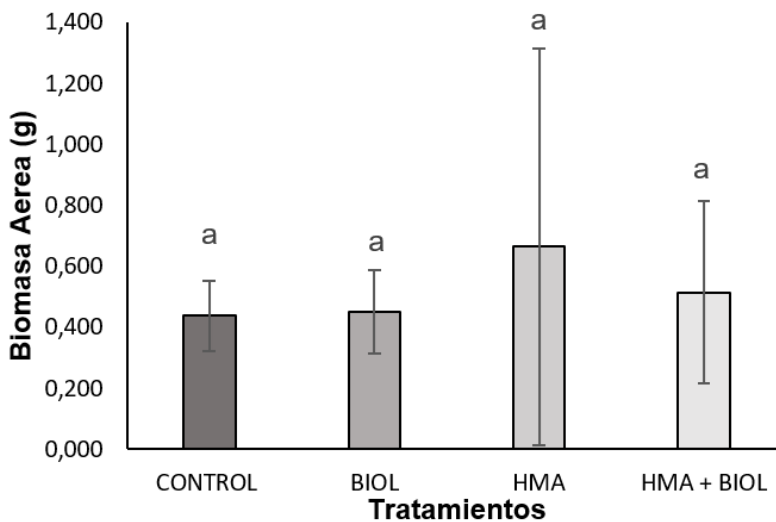
Biomasa vegetal y absorción de metales: brotes y raíces

Biomasa aérea y absorción de Zn en hojas

Las plantas de girasol presentaron un crecimiento en el suelo contaminado con Zn. La biomasa aérea de *Helianthus annuus* no evidenció diferencias significativas entre los tratamientos (Figura 1).

Figura 1

Biomasa aérea de plantas de Girasol creciendo en suelo contaminado con 500 mg/Kg de zinc de acuerdo con sus tratamientos



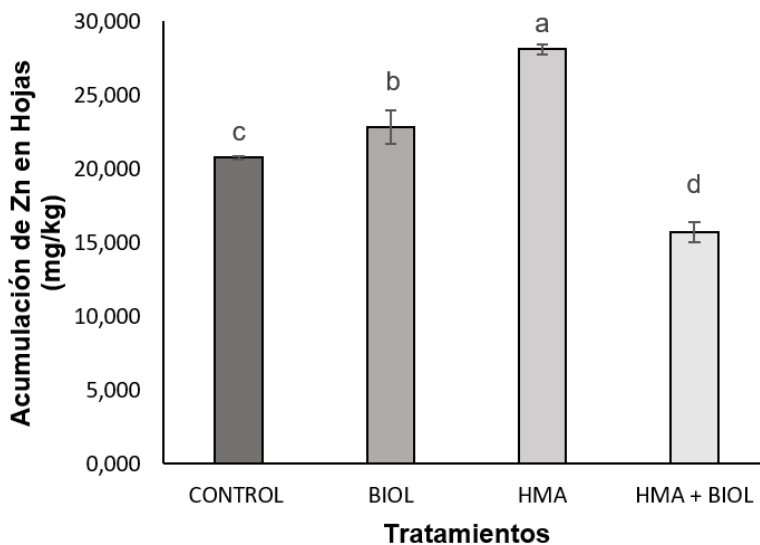
Nota. Control: no inoculado. Biol: fertilizante orgánico. HMA: hongo micorrícico arbuscular. Cada columna representa el promedio de las tres repeticiones.

Las barras de erros representan la desviación estándar de los datos. Las letras minúsculas diferentes sugieren diferencia estadística de los datos.

Por otro lado, la absorción de Zn en las hojas del *Helianthus annus* aumentó significativamente ($P < 0.05$) en el tratamiento con HMA, obteniendo una diferencia significativa con los demás tratamientos, teniendo una absorción de Zn de 28.112 mg/Kg (Figura 2). Aunque el HMA tiene una absorción mayor de Zn, la planta de girasol, por su característica de hiperacumuladora, tiene la capacidad de absorber el Zn por sí solo, absorbiendo 20.7mg/kg.

Figura 2

Acumulación de Zn en hojas de las plantas de girasol en suelo contaminado con 500 mg/Kg de zinc de acuerdo con sus tratamientos



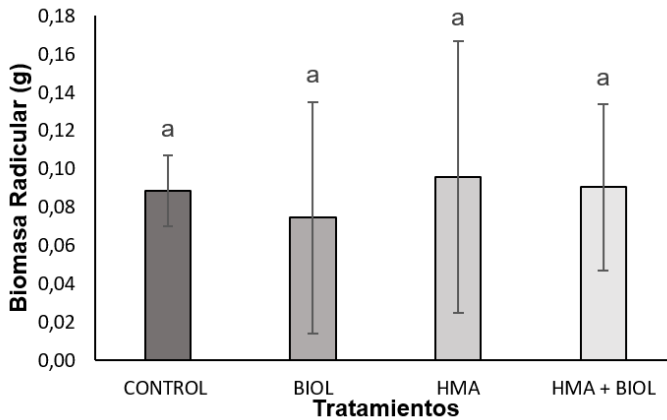
Nota. Control: no inoculado. Biol: fertilizante orgánico. HMA: hongo micorrícico arbuscular. Cada columna representa el promedio de las tres repeticiones. Las barras de erros simbolizan la desviación estándar de los datos. Las letras minúsculas diferentes sugieren diferencia estadística de los datos.

Biomasa radicular y absorción de Zn en raíces

La biomasa radicular de los brotes de *Helianthus annus* no presentó diferencia significativa ($P < 0.05$) entre los tratamientos (Figura 3).

Figura 3

Biomasa radicular de plantas de girasol en suelo contaminado con 500 mg/Kg de zinc de acuerdo con sus tratamientos

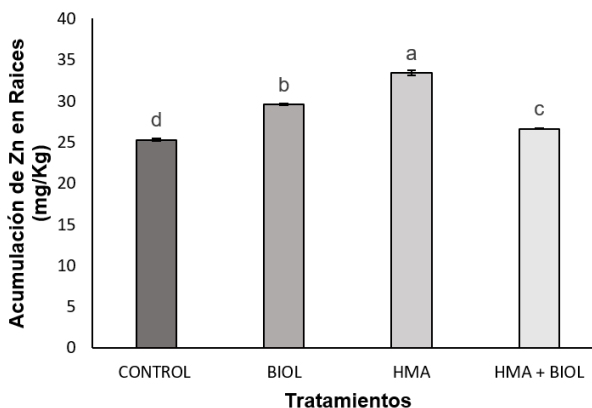


Nota. Control: no inoculado. Biol: fertilizante orgánico. HMA: hongo micorrícico arbuscular. Cada columna representa el promedio de las tres repeticiones. Las barras de erros representan la desviación estándar de los datos. Las letras minúsculas diferentes sugieren diferencia estadística de los datos.

La acumulación de Zn en las raíces de *Helianthus annuus* aumentó de manera significativa ($P < 0.05$) en el tratamiento con HMA, mostrando una diferencia estadística entre todos los tratamientos. El control tuvo un efecto de acumulación en el área radicular de la planta, acumulando 25.3 mg/kg, debido a la característica hiperacumuladora del girasol, dada la capacidad de las raíces de ser más largas y absorber con más facilidad el contaminante (Figura 4).

Figura 4

Acumulación de Zn en raíces de plantas de Girasol en suelo contaminado con 500 mg/Kg de zinc de acuerdo con sus tratamientos



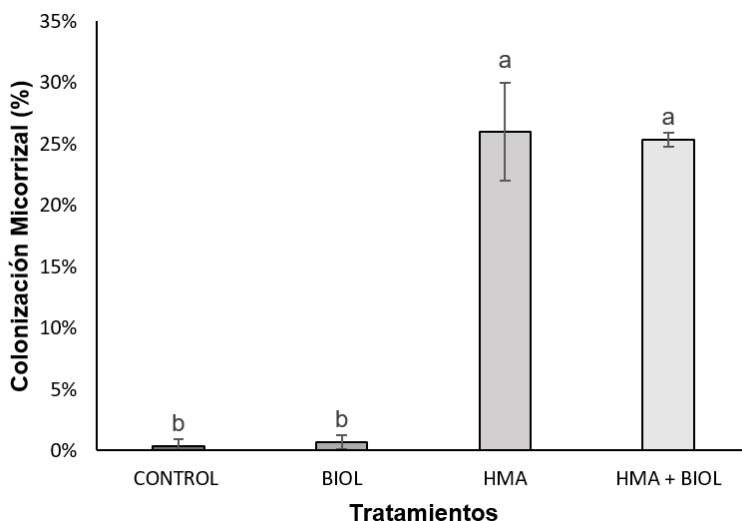
Nota. Control: no inoculado. Biol: fertilizante orgánico. HMA: hongo micorrícico arbuscular. Cada columna representa el promedio de las tres repeticiones. Las barras de erros muestran la desviación estándar de los datos. Las letras minúsculas diferentes sugieren diferencia estadística de los datos.

Porcentaje de colonización micorrizal

El porcentaje de colonización micorrizal en las raíces de la planta en el suelo contaminado con Zn fue significativamente mayor ($P < 0.05$) en el tratamiento con HMA y HMA+Biol, con 26 % comparados con las muestras no inoculadas (1 %) (Figura 5).

Figura 5

Porcentaje de colonización micorrizal en plantas de girasol en suelo contaminado con 500 mg/Kg de zinc de acuerdo con sus tratamientos



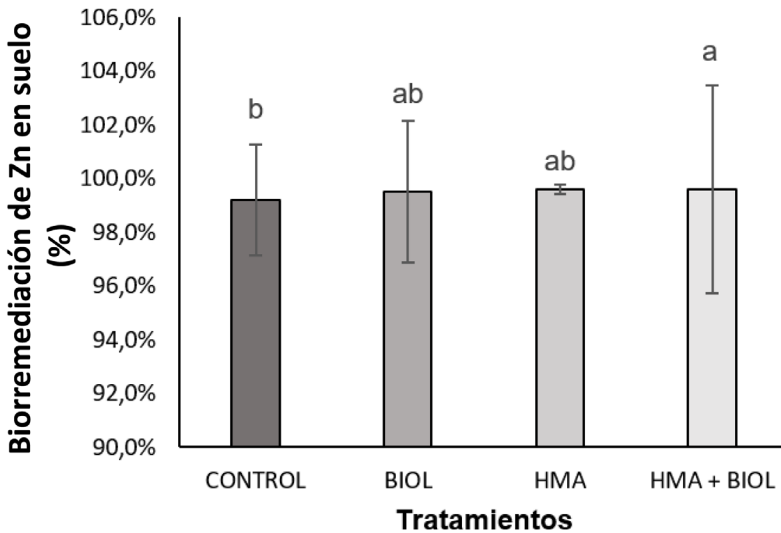
Nota. Control: no inoculado. Biol: fertilizante orgánico. HMA: hongo micorrícico arbuscular. Cada columna representa el promedio de las tres repeticiones. Las barras de erros significan la desviación estándar de los datos. Las letras minúsculas diferentes sugieren diferencia estadística de los datos.

Porcentaje de biorremediación en el suelo

Todas las plantas generaron una acumulación de Zn, como se muestra en la Figura 6, por lo que su concentración en el suelo disminuyó significativamente ($P < 0.05$) en todos los tratamientos, obteniendo concentraciones desde 3.9 mgZn/Kg suelo en el control, hasta la concentración más baja en el tratamiento de HMA 2.0 mgZn/Kg suelo, obteniendo una biorremediación en el suelo del 99,6 %.

Figura 6

Porcentaje de biorremediación en plantas de girasol en suelo contaminado con 500 mg/Kg de zinc de acuerdo con sus tratamientos



Nota. Control: no inoculado. Biol: fertilizante orgánico. HMA: hongo micorrícico arbuscular. Cada columna representa el promedio de las tres repeticiones. Las barras de erros evidencian la desviación estándar de los datos. Las letras minúsculas diferentes sugieren diferencia estadística de los datos.

El análisis estadístico realizado demuestra que existe una diferencia significativa entre los controles y los tratamientos de las plantas, indicando que el zinc disminuyó significativamente al usar el girasol.

Conclusiones

El girasol logró crecer en el suelo contaminado con Zn en una concentración de 500 mg/Kg, demostrando su capacidad hiperacumuladora con porcentajes de fitorremediación de hasta el 99,2 % en 90 días.

La inoculación con HMA y la adición de fertilizantes como biol mejoran el efecto de hiperacumulación de las plantas de girasol, obteniendo un porcentaje de fitorremediación del 99,6 %, gracias a la promoción de crecimiento y desarrollo de las plantas.

Los HMA promueven el crecimiento de las plantas de girasol y mitigan los efectos tóxicos del Zn cuando se encuentran en altas concentraciones.

Referencias

- Alloway, B. J. (2008). *Zinc in soils and crop nutrition*. International Zinc Association and International Fertilizer Industry Association.
- Amezcuca, J. C. y Lara, M. (2017). El zinc en las plantas. *Ciencia*, 68(3), 28-35.
- Ariza, M. C. y Pinzón, L. D. (2022). *Tratamiento de suelos impactados por elementos traza de zinc, cobre y níquel mediante aplicación de zeolitas como agente inmovilizador* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria
- Bernal, M. P., Clemente, R., Vázquez, S. y Walker, D. J. (2007). Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Ecosistemas*, 16(2).
- Borrero, G. A., Jiménez, J., Ricaurte, J. J., Rivera, M., Polanía, J. A., Núñez, J., Barbosa, N., Arango, J., Cardoso, J. A. y Rao, I. M. (2017). *Manual de protocolos. Nutrición y fisiología de plantas. Forrajes y frijol*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT).
- Broadley, M. R., White, P. J., Hammond, J. P., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, 173(4), 677-702. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.01996.x>
- Casierra-Posada, F. y Poveda, J. (2005). La toxicidad por exceso de Mn y Zn disminuye la producción de materia seca, los pigmentos foliares y la calidad del fruto en la fresa. *Agronomía Colombiana*, 23(2), 283-289.
- Cañizares-Villanueva, R. O. (2000). Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana. *Revista Latinoamericana de Microbiología*, 42, 131-143.
- Fajardo, C. A. (2017). *Biorremediación de metales pesados*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia
- Garbisu, C., Epelde, L. y Becerril, J. M. (2008). Fitorremediación. *Ecologista*, (57).
- Gielnik, A., Pechaud, Y., Huguenot, D., Cébron, A., Esposito, G., & van Hullebusch, E. D. (2019). Bacterial seeding potential of digestate in bioremediation of diesel contaminated soil. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2019.06.003>
- González, H. y Fuentes, N. (2017). Mecanismo de acción de cinco microorganismos promotores de crecimiento vegetal. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 34(1), 17-31. <https://doi.org/10.22267/rcia.173401.60>

- Grandez, M. G. (2017). *Remoción de cadmio y plomo en suelos a orillas del río Mantaro, Junín, mediante fitorremediación con girasol (Helianthus Annus) y maíz (Zea Mays) usando enmiendas* [Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/3537>
- Gutiérrez-Espinoza, L. R., Alarcón-Herrera, M. T., Prado-Tarango, D. E., Cedillo-Alcantar, M. E., Melgoza-Castillo, A. y Ortega-Gutiérrez, J. A. (2005). Germinación del girasol (*Helianthus annuus*) bajo diferentes concentraciones de metales. *Revista Latinoamericana de biotecnología ambiental y algal*, 2(1), 49-56
- Hamzah Saleem, M., Usman, K., Rizwan, M., Al Jabri, H., & Alsafran, M. (2022). Functions and strategies for enhancing zinc availability in plants for sustainable agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1033092>
- Lin, Y. F. & Aarts, M. G. M. (2012). The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 69(19), 3187-3206). <https://doi.org/10.1007/s00018-012-1089-z>
- Llanos, P. H. (2001). La solución nutritiva, nutrientes comerciales, fórmulas completas. www.drcalderonlabs.com/Hidroponicos/Soluciones1.html
- Munive, R., Gamarra, G., Munive, Y. Puertas, F., Valdiviezo, L., & Cabello, R. (2020). Lead and cadmium uptake by sunflower from contaminated soil and remediated with organic amendments in the form of compost and vermicompost. *Scientia Agropecuaria*, 11(2), 177–86. <https://doi.org/10.17268/SCI.AGROPECU.2020.02.04>
- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M. y Villar, S. (2007). Técnicas de recuperación de suelos contaminados. <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>
- Pérez, E. y Alvarado, D. C. (2018). Cuantificación por absorción atómica de Cu, Fe y Zn en alcohol destilado y agua. *Cuadernos de Investigación UNED*, 10(2), 387-396. <https://dx.doi.org/10.22458/urj.v10i2.1998>
- Ramírez, S. C. (2005). *Evaluación y seguimiento de la acción mixta de fitorremediación con helianthus annuus y biorremediación con micorrizas vesículo arbuscular M.V.A en un suelo contaminado con Zn y Cu* [Tesis de pregrado, Universidad de La Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=2634&context=ing_ambiental_sanitaria
- Royo, A., Fernández, M. y Gil, L. (1997). Predicción de la supervivencia y crecimiento de las plantas de vivero mediante medidas de parámetros, fisiológicos pre y post-trasplante. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (4). <https://doi.org/10.31167/csef.v0i4.9100>

- Schulte, E. E. (2004). Soil and Applied Zinc. <https://soilsextension.webhosting.cals.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/68/2014/02/A2528.pdf>
- Shettyfl, K. G., Hetrick, B. A., & Schwab, A. P. (1995). Effects of mycorrhizae and fertilizer amendments on zinc tolerance of plants. *Environmental Pollution*, 88(3), 307-314. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)93444-5](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)93444-5)
- Sinclair, S. A. & Krämer, U. (2012). The zinc homeostasis network of land plants. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1823(9), 1553-1567. <https://doi.org/10.1016/j.bbamcr.2012.05.016>
- Vega, L. T., Vega, D. A. y Poveda, F. A. (2020). Evaluación de un digestado como fertilizante orgánico. *IDESIA*, 38(3), 87-96. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000300087>
- Velásquez, J. A. (2017). Contaminación de suelos y aguas por hidrocarburos en Colombia. Análisis de la fitorremediación como estrategia biotecnológica de recuperación. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(1), 151-167. <https://doi.org/10.22490/21456453.1846>
- Vital-Vilchis, I., Quiñones-Aguilar, E. E., Hernández-Cuevas, L. V., & Rincón-Enríquez, G. (2020). Growth of ornamental sunflower in pot at field level by effect of arbuscular mycorrhizal fungi. *Terra Latinoamericana*, 38(3), 679-692. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.715>
- Wang, F., Liu, X., Shi, Z., Tong, R., Adams, C. A., & Shi, X. (2016). Arbuscular mycorrhizae alleviate negative effects of zinc oxide nanoparticle and zinc accumulation in maize plants - A soil microcosm experiment. *Chemosphere*, 147, 88-97. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.076>
- Wei, Z., Gu, H., Van Le, Q., Peng, W., Lam, S. S., Yang, Y., Li, C., & Sonne, C. (2021). Perspectives on phytoremediation of zinc pollution in air, water and soil. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100550>
- Yan, M., Tian, H., Song, S., Tan, H. T. W., Lee, J. T. E., Zhang, J., Sharma, P., Tiong, Y. W., & Tong, Y. W. (2023). Effects of digestate-encapsulated biochar on plant growth, soil microbiome and nitrogen leaching. *Journal of Environmental Management*, 334, 117481. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117481>

Capítulo 15.

Evaluación de nutrientes en humus de café con *Ancognatha scarabaeoides* mediante compostaje y variación del sustrato

Dayana Elizabeth Botina Gómez¹

María Camila Burbano Pantoja²

Anyi Paola España Bucheli³


Juan Carlos Narváez Narváez⁴


Cítese como: Botina-Gómez, D. E., Burbano-Pantoja, M. C., España-Bucheli, A. P. y Narváez-Narváez, J. C. (2024). Evaluación de nutrientes en humus de café con *Ancognatha scarabaeoides* mediante compostaje y variación del sustrato. J. L. Huertas-Delgado y S. M. Madroñero-Palacios (comps.), *Desafíos de la sostenibilidad en el desarrollo: un enfoque desde las ciencias ambientales* (pp. 210-224). Editorial Unimar. <https://doi.org/10.31948/editorialunimar.258.c433>

Resumen


En el departamento de Nariño, el beneficio inicial del café produce subproductos húmedos con alto impacto ambiental, principalmente compuestos por pectina, mesocarpio y endocarpio del fruto, que son eliminados mediante técnicas como la remoción húmeda con alto consumo de agua. Según la Federación Nacional de Cafeteros (2015), esto genera 115 g de DQO por kilogramo de café cereza.

El estudio propuso el tratamiento no convencional de los subproductos mediante vermicompostaje con la especie *Ancognatha scarabaeoides* –Mojojoy-, conocida como alimento en algunas regiones del país. Se llevó a cabo un experimento factorial para evaluar el contenido de nutrientes como Nitrógeno (N), Fósforo (P) Potasio (K) y Sodio (Na), variando la composición del sustrato porcentualmente entre el contenido de suelo y subproductos aplicados, con tres niveles y un testigo que contenía el 100 % de los subproductos del beneficio de café.

¹ Ingeniera ambiental, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: elizabethbotinagomez@gmail.com 

² Ingeniera ambiental, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia. Correo electrónico: camilabur19@gmail.com 

³ Ingeniera ambiental, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia.

⁴ Magíster en Ingeniería ambiental, Universidad Mariana, San Juan de Pasto, Colombia. Correo electrónico: jcnarvaez@umariana.edu.co 

Los resultados obtenidos permitieron evidenciar un aumento en el contenido de nutrientes en el humus obtenido a partir del compostaje de los subproductos del beneficio húmedo del café y con la especie animal mojoyoy. Esto indica que, el uso de estos subproductos y la presencia del mojoyoy cumplen con la función de enriquecer el humus con nutrientes esenciales para el suelo y las plantas.

Palabras clave: compostaje; humus; subproductos de café; *Ancognatha scarabaeoides*; análisis de nutrientes

Introducción

En los últimos años, el desarrollo agrícola se ha caracterizado por una producción intensiva, con un uso excesivo de fertilizantes y plaguicidas, así como prácticas de manejo, que han provocado pérdida de fertilidad, erosión y contaminación del suelo. La expansión del cultivo de café en Colombia, especialmente en el departamento de Nariño, ha tenido un impacto significativo, siendo esta región, reconocida por su alta calidad de producción, valorada en el comercio internacional (Criollo et al., 2016).

En el proceso de cultivo e industrialización del café se utiliza únicamente el 5 % del peso del fruto fresco para la bebida, dejando el 95 % restante como residuo, incluyendo pulpa, mucílago, cisco, pasillas, borra y tallos de café (Rodríguez, 2007). La pulpa, que representa aproximadamente el 43,58 % del peso del fruto fresco, es el principal subproducto, con una producción media de 2.25 toneladas frescas por hectárea al año (Rodríguez, 2007).

Antes de la aparición de los fertilizantes químicos, los abonos orgánicos eran la principal fuente de nutrientes para el suelo, reconocidos por mejorar sus condiciones físicas y químicas, por reemplazar la materia orgánica perdida y, por estimular la actividad biológica (Morionez y Montes-Rojas, 2017).

Los abonos no solo mejoran la productividad y calidad del suelo, sino que preservan el medio ambiente, al contribuir a la conservación del suelo y prevenir la erosión. Además, promueven prácticas sostenibles, mejoran la calidad del agua y reducen la contaminación, creando efectos positivos en la conservación del suelo y protección del medio ambiente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, FAO, 1996). La amplia variedad de abonos orgánicos en el mercado se debe a la disponibilidad de varias materias primas y procesos de elaboración. En los últimos años, su uso ha experimentado un aumento significativo en la producción de cultivos, impulsado por su impacto positivo en las propiedades del suelo y su potencial como alternativa a los fertilizantes sintéticos (Durán-Umaña y Henríquez-Henríquez, 2010). Dentro de esta categoría se incluye métodos como el compostaje tradicional y el vermicompost.

El vermicompostaje consiste en un tratamiento descentralizado que reduce la cantidad de residuos y los valoriza, convirtiéndolos en un material valioso para los suelos. Con estas técnicas se contribuye a disminuir la generación de residuos y, autoabastecer con un producto de alto valor para la fertilidad de huertos y jardines (Villegas-Cornelio y Laines, 2017). De esta manera se evita el transporte de estos residuos a largas distancias, así como su tratamiento en grandes plantas centralizadas, lo que redundaría en una reducción de la contaminación ambiental y del impacto que producen las grandes instalaciones de tratamiento de residuos. Otro de los beneficios del autocompostaje es que la ciudadanía se implica directamente en la gestión de sus residuos orgánicos y ahorra en la compra de abonos, enmiendas o sustratos (Adhikary, 2012).

Este trabajo se centró en producir humus utilizando subproductos del café y la especie mojoy para descomponer material orgánico. Se hizo experimentos para analizar nutrientes en diferentes etapas del compostaje, con el propósito de obtener un humus de calidad para enriquecer el suelo y reducir los impactos negativos en el recurso suelo e hídrico causados por la actividad agrícola. El suelo desempeña un papel crucial en el equilibrio ecológico, al filtrar sustancias y proteger las aguas subterráneas y superficiales (Cotler et al., 2007).

Desarrollo del tema

Implementación del tratamiento de compostaje con *Ancognatha scarabaeoides* –mojoy- con las medidas adecuadas

Caracterización fisicoquímica de los subproductos del café y suelo

Principalmente, se llevó a cabo una caracterización fisicoquímica de los subproductos del café y del suelo mediante prácticas de laboratorio en la sede Alvernia de la Universidad Mariana. La Tabla 3 permite evidenciar estos resultados; se especifica los valores promedio de cada parámetro medido. Cabe resaltar que se hizo tres repeticiones de cada parámetro, con el fin de ser más precisos y disminuir el margen de error en las mediciones.

Tabla 1

Caracterización fisicoquímica de los subproductos del café y suelo

Parámetro	Valores sub. café	Valores suelo	Unidades	Método utilizado
pH	5,78	5,726	-	Potenciómetro
Conductividad eléctrica	3,79	0,167	mS/cm	Conductímetro
Humedad	78,71	4,46	%	Método gravimétrico

Nitrógeno	0,1	0,264	%	Método Kjeldahl
Fósforo	0,957	1,469	mg/L	Espectrofotómetro
Sodio	0,835	0,761	mg/L	Absorción atómica
Potasio	30,891	4,876	mg/L	Absorción atómica
Azúcares	49,033	-	mg/L	Espectrofotómetro
Grasas y aceites	22,48	-	%	Extractor Soxhlet
Densidad real	1,42	2,03		Método picnómetro
Densidad aparente	0,3	0,72		Método cilindro graduado
Color	Rojo	10YR 3/2	-	Organoléptico
Olor	Dulce	N/A	-	Organoléptico

Luego de realizar la caracterización fisicoquímica de los subproductos del café y del suelo, se implementó tres niveles de tratamiento de compostaje utilizando *Ancognatha scarabaeoides* –mojojoy-. Se añadió 15 *Ancognatha scarabaeoides* a cada caja de compostaje para llevar a cabo el proceso. Las pilas fueron cubiertas con polisombra para evitar la entrada de vectores y depredadores y, asegurar que la especie compostera no se fugue.

Figura 1

Figura de tratamiento de compostaje con *Ancognatha scarabaeoides*



Se llevó a cabo la determinación cuantitativa de los nutrientes presentes en cada nivel mediante cálculos estequiométricos. Esta evaluación se considera como la concentración inicial de los nutrientes relevantes en los tres niveles implementados.

Tabla 2

Nutrientes iniciales del proceso del compost

Nutriente	Unidades	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Nitrógeno	%	0,186	0,219	0,237
Fósforo	mg/L	1,226	1,329	1,386
Potasio	mg/L	0,796	0,781	0,772
Sodio	mg/L	17,218	11,971	9,071

Los cálculos de los nutrientes estuvieron basados en las concentraciones identificadas durante la caracterización fisicoquímica del suelo y los subproductos del café. Se consideró la cantidad de materia prima en cada nivel para garantizar la precisión de los resultados y establecer las concentraciones iniciales de nutrientes. Estas concentraciones fueron cruciales para identificar diferencias significativas al final del proceso de compostaje. Este enfoque integral mejora la comprensión de las transformaciones nutricionales y fortalece la validez y la interpretación de los resultados, proporcionando una visión más completa de la eficacia del proceso con mojoy.

Estabilización de los procesos fisicoquímicos y biológicos en los tratamientos para la obtención de humus

Se llevó a cabo muestras semanales de los tratamientos implementados para observar su comportamiento durante el proceso de compostaje, considerando variables como temperatura, pH, conductividad eléctrica y humedad. El proceso duró 70 días, cumpliendo con el marco temporal recomendado por Restrepo et al. (2014) para la cosecha óptima de humus. Se hizo dos volteos por semana para acelerar la descomposición. Para la cosecha, se buscó un olor agradable y un color oscuro similar al del suelo, manteniendo un pH entre 7 y 8 (UAESP y SIPAF, 2014).

Parámetros medidos para el proceso de compostaje

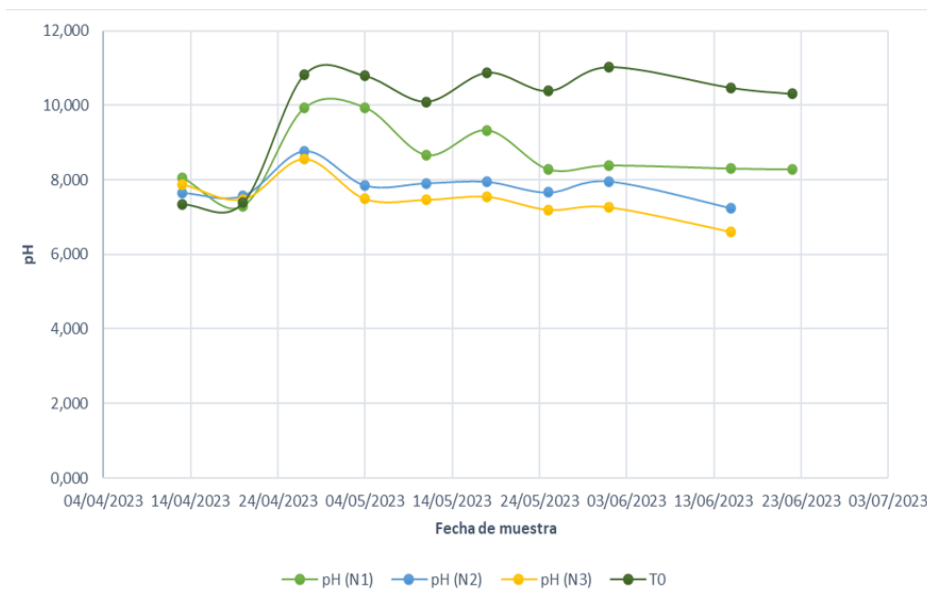
Los datos de las variables de seguimiento de los sistemas de compostaje, con tres tratamientos y un testigo, fueron sometidos a una prueba de Kruskal-Wallis para determinar su significancia. No se halló diferencias significativas entre las repeticiones de cada tratamiento ($p > 0.05$), pero sí hubo diferencias significativas en comparación con el testigo ($p < 0.05$), que consistía solo de subproductos de café.

pH

El pH es importante en los abonos orgánicos dado que, si este es demasiado ácido o alcalino, algunos nutrientes pueden volverse menos disponibles, lo que puede llevar a producir una falta de nutrientes.

Figura 1

Resultados obtenidos de pH en el proceso de compostaje para los tres tratamientos y testigo



En este estudio se observa que, al iniciar el proceso de compostaje, las pilas oscilaban con pH neutro, entre 7 y 8, pero, después de la tercera semana, se dio un incremento significativo hasta alcanzar un valor cercano a 10 para el nivel 1 y valores por encima de 8 en los niveles 2 y 3. Sin embargo, el testigo obtuvo valores por encima de 10, lo que sugiere que los subproductos de café tienen un pH significativamente alcalino; es decir que, hay una buena descomposición del material orgánico (Moreno y Romero, 2016). Según Bueno et al. (2008), los niveles 2 y 3 experimentan una disminución en el pH debido a la formación de ácidos orgánicos en condiciones anaeróbicas. En contraste, el nivel 1 termina con un pH neutro de 8.282, atribuido a la formación de compuestos húmicos con propiedades de tampón.

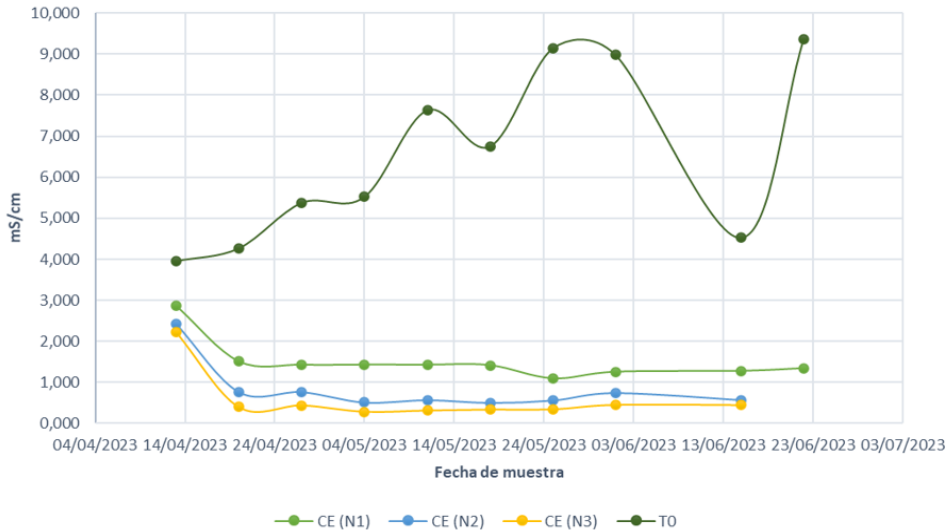
Conductividad eléctrica (CE)

La CE de un compost está determinada por la naturaleza y composición del material de partida, fundamentalmente por su concentración de sales y, en menor grado,

por la presencia de iones amonio o nitrato formados durante el proceso (Sánchez-Monedero, 2001).

Figura 2

Resultados de conductividad eléctrica en el proceso de compostaje para los tres tratamientos y testigo



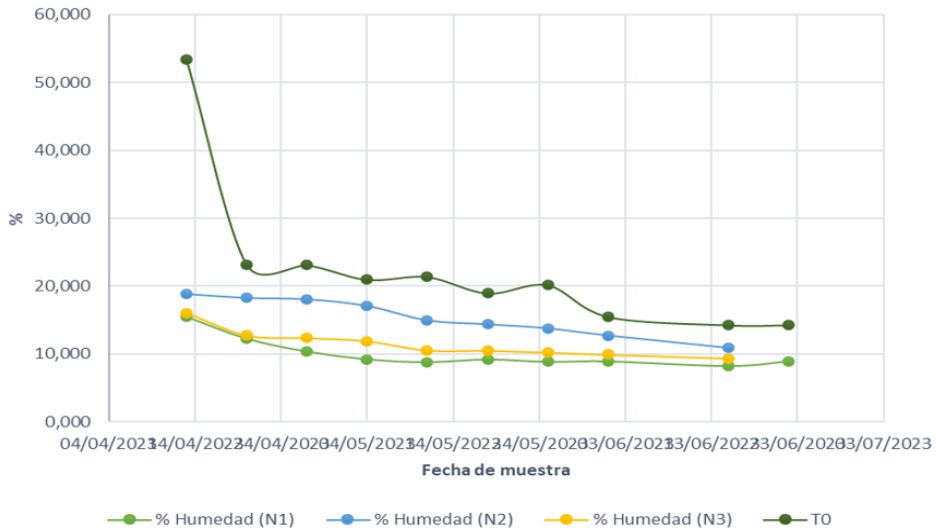
En el presente estudio se observó que los valores de CE en los tres niveles analizados mostraron una media significativamente baja (Nivel 1: 1.504; Nivel 2: 0.826; Nivel 3: 0.584), en comparación con los valores reportados por Röben (2002), debido a que era un compost de buena calidad. Los valores de CE deben estar situados en un rango de 2.0 a 4.0 mS/cm. Resultados similares fueron reportados por Pierre et al. (2009) en su estudio sobre compost de pulpa de café, donde obtuvieron valores de CE en el intervalo de 2.39 a 2.86 mS/cm. Bajo este fundamento, se puede afirmar que el nivel 1 es el que mejor se ajusta a este intervalo. Es importante señalar que, aunque no alcanza estos valores exactos, es el nivel que más se aproxima para ser considerado un compost de buena calidad.

Porcentaje de humedad

La humedad en los abonos orgánicos asegura que los procesos de descomposición y mineralización ocurran de manera efectiva. Cuando los materiales orgánicos se descomponen, los nutrientes se liberan; si el abono está demasiado seco, estos procesos se ralentizan, lo que afecta la disponibilidad de nutrientes.

Figura 3

Resultados obtenidos de porcentaje de humedad en el proceso de compostaje para los tres tratamientos y testigo



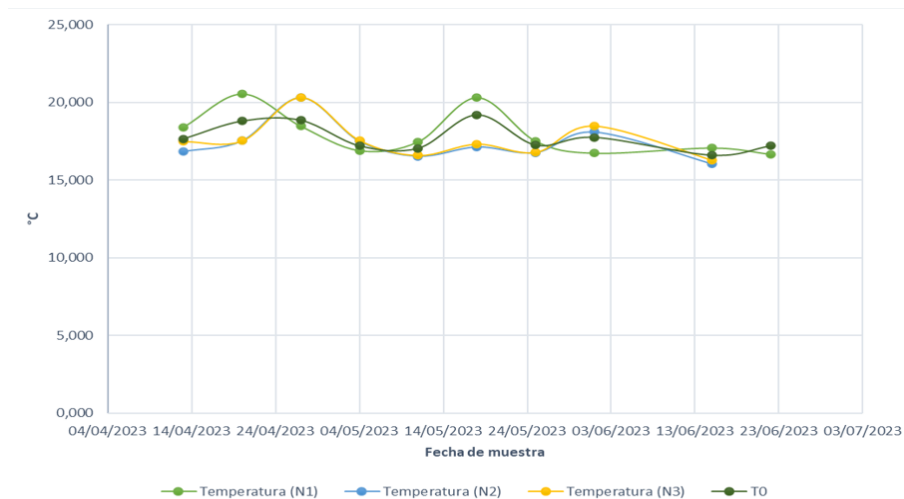
El testigo mostró inicialmente un alto porcentaje de humedad debido al contenido de agua en la pulpa de café, como señalan Armas et al. (2008). Sin embargo, este porcentaje disminuyó significativamente después de la segunda semana, debido a la descomposición libre y las condiciones ambientales, lo que afectó la actividad microbiana (Arias-Hernández, 1995). Posteriormente, la humedad continuó disminuyendo debido a factores climáticos y condiciones ambientales, influenciando los niveles de humedad en la pulpa de café (Vargas y Mazón, 2004). Los tres niveles estudiados mostraron comportamientos similares, dada la capacidad del suelo para absorber y retener la humedad (Haug, 1993; Madejón et al., 2002; Jeris et al., 1973), considerada como una variable clave en el compostaje (Bueno et al., 2008).

Temperatura

La temperatura ha sido considerada tradicionalmente como una variable fundamental en el control del compostaje (Liang et al., 2003; Miyatake et al., 2006). En la Figura 4 se puede observar una tendencia de resultados que depende netamente de las condiciones climáticas y ambientales del lugar donde se implementó las pilas.

Figura 4

Resultados obtenidos de temperatura en el proceso de compostaje para los tres tratamientos y testigo



Durante el proceso de compostaje con *Ancognatha scarabaeoides*, las temperaturas no superaron los 20 °C debido al gradiente de temperatura en el lugar, lo que provocó una baja actividad microbiana y una descomposición lenta de los subproductos del café (Ruiz-Morales, 2011).

Por otro lado, para la producción de abonos como el vermicompost, las temperaturas óptimas oscilaron entre 20 °C y 28 °C, estimulando la actividad de las lombrices y acelerando la descomposición (Restrepo et al, 2014). Aunque las lombrices pueden sobrevivir en un rango más amplio de temperaturas (Ruiz-Morales, 2011; Stack et al., 2024). A pesar de mantener temperaturas óptimas en el compost, las condiciones climáticas contribuyeron a la pérdida de calor en las pilas, lo que puede relacionarse con el volumen de la mezcla sugiriendo que pilas más grandes podrían experimentar un aumento en la temperatura (Bustinza y Gómero, 2023).

Análisis de las diferencias en el contenido de nutrientes que presenta el humus obtenido en los tratamientos

Para llevar a cabo el tercer objetivo, los nutrientes de interés de cada una de las pilas de compostaje fueron cuantificados, con el fin de determinar si el proceso fue satisfactorio. Se tuvo en cuenta las concentraciones iniciales de la mezcla de los tres niveles implementados del proceso de compostaje para determinar dichas diferencias, como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3

Nutrientes finales del proceso del compost

Nutriente	Unidades	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Nitrógeno	%	0,136	0,287	0,214
Fósforo	mg/L	1,466	0,393	0,329
Potasio	mg/L	1,16	0,666	0,374
Sodio	mg/L	29,477	27,899	24,07

Nitrógeno (N)

La concentración de nitrógeno en el humus obtenido en los tres niveles (N1, N2 y N3) fue de 0,136 %, 0,287 % y 0,214 %, respectivamente, valores significativamente inferiores a los reportados por Nuñez Martos (2019) y Albarracín et al. (2018).

Se observó una disminución en la concentración de N en el N1 durante el compostaje, debido posiblemente al consumo por la especie descomponedora y al lavado de nitritos, nitratos y sales amoniacales en el agua aplicada. En los niveles 2 y 3 se registró un aumento en la concentración de N, atribuido a la presencia de suelo que contiene un porcentaje elevado de este elemento. La proporción de suelo también contribuye a este incremento, siendo mayor que la de los subproductos de café, lo que sugiere una relación directa entre la concentración de N y la presencia de suelo (Arias-Hernández, 1995).

Fósforo (P)

Durante el compostaje, el P es esencial para el crecimiento de las plantas, y su concentración puede variar. En el nivel 1 se observó un aumento en su concentración, de 1,226 mg/l a 1,466 mg/l, atribuido a la liberación de la materia orgánica en descomposición y la actividad microbiana (Román et al., 2013).

Para los niveles 2 y 3 se registró una disminución significativa en la concentración de P, debida posiblemente a procesos de inmovilización, lixiviación y volatilización durante el compostaje (Puentes y Coronado, 2014). Estudios previos han reportado concentraciones más altas de fósforo en lombricompost de pulpa de café, superando los valores obtenidos en esta investigación (Blandón-Castaño et al., 1999; Nuñez Martos, 2019).

Potasio (K)

Los porcentajes de K en el humus del N1 muestran un aumento de 0,796 mg/L (0,0306 %) a 1,16 mg/L (0,0446 %), atribuido al vermicompostaje con mojoy, favoreciendo la presencia de nutrientes (Mikolic et al., 2018). En contraste, los N2 y N3 experimentaron disminuciones del nutriente, atribuidas a la descomposición de materia orgánica y la posible pérdida de nutrientes esenciales con el tiempo (Mencía y Reyes, 2018; Arias-Hernández, 1995).

Las variables como temperatura, humedad y microorganismos influyen en este proceso. Estas variaciones están relacionadas con el contenido inicial de materia orgánica en cada pila, donde el N1 muestra una concentración superior al finalizar el proceso, en comparación con los N2 y N3, debido a los niveles iniciales de K en los subproductos de café.

Sodio (Na)

Se observó un aumento significativo en la concentración de Na en los tres niveles del proceso de compostaje. Los valores iniciales y finales para el N1 fueron de 17,218 mg/L (0,662 %) y 29,477 mg/L (1,132 %); para el N2 de 11,971 mg/L (0,395 %) y 27,899 mg/L (0,922 %) y, para el N3, de 9,071 mg/L (0,279 %) y 24,07 mg/L (0,741 %), respectivamente. Estos valores superan los obtenidos por Muñoz et al. (2015), lo que sugiere una eficaz descomposición de la materia orgánica por parte de *Ancognatha scarabaeoides*, generando un humus con valores nutricionales relevantes que pueden ser asimilados por el suelo y las plantas (Fierro-Cabrales et al., 2018).

Diferencias entre los tratamientos por variación del sustrato

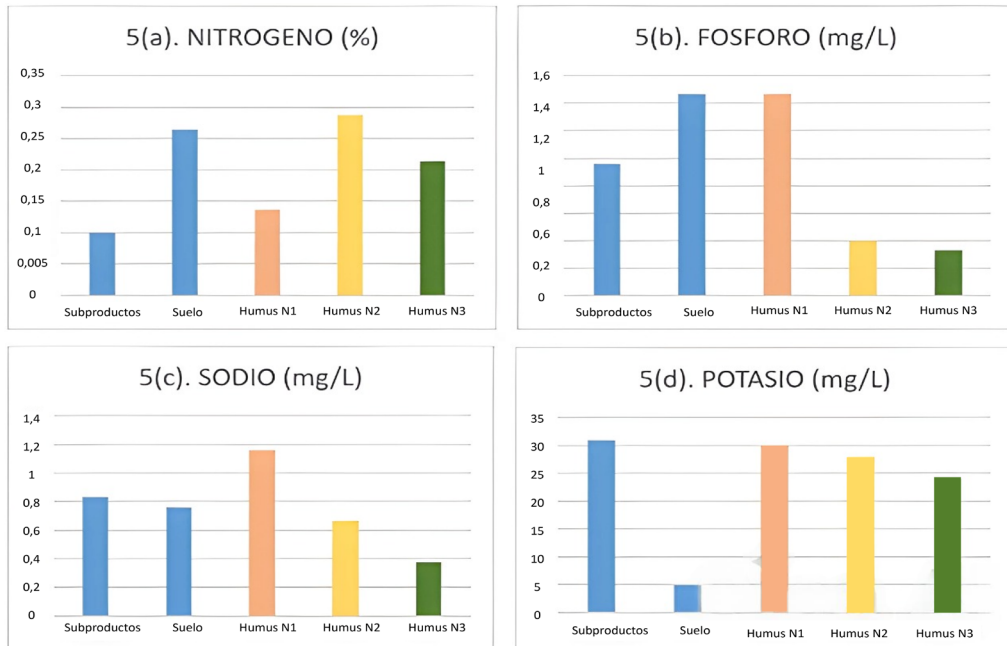
Se destaca diferencias en la concentración de nutrientes entre los tres tratamientos implementados: en el N1, con mayor cantidad de subproductos de café, se observó un aumento significativo en P, K y Na, atribuido al efectivo vermicompostaje con la especie animal mojoy, mejorando tanto los nutrientes como la estructura del suelo.

En los tratamientos N2 y N3, con mayor proporción de suelo, se evidenció variaciones en las concentraciones de nutrientes, siendo el N2 el único con un aumento en N y K, mientras que el N3 mostró disminuciones en P y Na. Las diferencias se relacionan con las cantidades de subproductos de café y suelo, así como con los niveles subóptimos de pH y CE en los tratamientos N2 y N3, afectando la actividad microbiana y la descomposición del material vegetal. En general, el tratamiento N1 presentó condiciones más favorables para la producción de un humus de calidad, mientras que los niveles N2 y N3 mostraron limitaciones en las variables de seguimiento, afectando la calidad del compost.

En la Figura 5 se puede visualizar los aportes y gastos de nutrientes; se debe tener en cuenta que el sustrato introducido al sistema se conformaba de proporciones diferentes de sustrato y suelo en cada nivel; sin embargo, los cambios en diferentes nutrientes permiten verificar la interacción nutricional con la especie depositada *Ancognatha scarabaeoides*.

Figura 5

Valores de los nutrientes asociados al estudio, sustratos y resultado final



El análisis del humus generado en diferentes tratamientos revela que las variaciones en los nutrientes están principalmente relacionadas con la cantidad de suelo añadida al sustrato. Se destaca la contribución de los subproductos del café, como la pulpa, el mucílago y la cáscara, en la mejora de nutrientes como el K y el Na, lo que sugiere su valor como enmiendas para suelos agotados por monocultivos.

La Figura 5(a) sugiere que el aumento en los niveles de N puede ser atribuible a la acción de la especie mojoy que, posiblemente, liberó N contenido en los subproductos del café. La mezcla homogénea de subproductos y suelo en el humus N2 parece regular la acción de los consumidores. La variación en los niveles de Na, representada en la Figura 5(c), sugiere que un exceso de subproducto, como en el humus N1, mejora la relación de este elemento, debido tal vez, a la transformación de residuos por la especie consumidora.

Conclusiones

Se confirmó la hipótesis al identificar diferencias en nutrientes (N, P, K y Na) en tres niveles de compostaje con *Ancognatha scarabaeoides*, variando en proporciones de sustratos (subproductos de café y suelo) para obtener humus. El nivel 1, con mayor proporción de subproductos de café, mostró incrementos en P, Na y K en el humus, atribuido a condiciones óptimas para descomposición microbiana. Los niveles 2 y 3, con más suelo, tuvieron variaciones en nutrientes debido a influencias en la disponibilidad final.

Los subproductos de café, con pH ácido de 5,78 revelan variabilidad en nutrientes y riqueza nutricional (azúcares, grasas), siendo idóneos para compostaje; contribuyen a mitigar impactos ambientales de la actividad agrícola cafetera.

“*Ancognatha scarabaeoides*” (mojojoy) es eficiente en compostaje, acelerando la descomposición de residuos orgánicos y mejorando la fertilidad del suelo. Su transición a fase adulta plantea riesgos, ya que puede convertirse en una plaga perjudicial para cultivos y flora local, generando desequilibrios en ecosistemas circundantes.

Referencias

- Adhikary, S. (2012). Vermicompost, the story of organic gold: A review. *Agricultural Sciences*, 3(7), 905-917. <https://doi.org/10.4236/as.2012.37110>
- Albarracín, D. M., Roa, A. L., Solano, F. y Montañez, G. (2018). Producción de abono orgánico mediante el compostaje aerotérmico de residuos de poda. *Bistua*, 16(1), 156-162. <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2018.3203>
- Arias-Hernández, J. J. (1995). *Caracterización de la pulpa de café en diferentes tiempos de descomposición y su efecto en almácigos de café* [Tesis de pregrado, Universidad de Caldas]. <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/31962?show=full>
- Blandón-Castaño, G., Dávila-Arias, M. T. y Rodríguez-Valencia, N. (1999). Caracterización microbiológica y físico-química de la pulpa de café sola y con mucílago, en proceso de lombricompostaje. *Cenicafé*, 50(1), 5-23.
- Bueno, P., Díaz, M. J. y Cabrera, F. (2008). Factores que afectan al proceso de compostaje. En J. Moreno y R. Moral. *Compostaje* (pp. 93-109). Ediciones Mundi-Prensa.
- Cotler, H., Sotelo, E., Domínguez, J., Zorrilla, M., Cortina, S. y Quiñones, L. (2007). La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta ecológica*, (83), 5-71.
- Criollo, H., Lagos, T. C., Bacca, T. y Muñoz, J. A. (2016). Caracterización de los sistemas productivos de café en Nariño, Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad y Divulgación Científica*, 19(1), 105–113. <https://doi.org/10.31910/rudca.v19.n1.2016.260>
- Durán-Umaña, L. y Henríquez-Henríquez, C. (2010). El vermicompost: su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta en la planta. *Agronomía Mesoamericana*, 21(1), 85-93. <https://doi.org/10.15517/am.v21i1.4914>
- Federación Nacional de Cafeteros. (2015). *Beneficios del café en Colombia*. FNC – Cenicafé.
- Fierro-Cabrales, N., Contreras-Oliva, A., González-Ríos, O., Rosas-Mendoza, E. y Morales-Ramos, V. (2018). Caracterización química y nutricional de la pulpa de café (*Coffea arabica* L.). *Agroproductividad*, 11(4), 9-13.
- Mikolic, C., Ruffinelli, S., Dárdano, B., Jorge Escudero, G., Andreoni, I., Gómez, A. y Basile, D. (2018). *Manual de vermicompostaje: Cómo reciclar nuestros residuos orgánicos*. Montevideo Ambiente.

- Moreno, N. y Romero, A. A. (2016). *Evaluación de diferentes métodos para la transformación de la pulpa de café en abono orgánico en fincas cafeteras* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales]. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/2620>
- Moronez, M. L. y Montes-Rojas, C. (2017). Aporte de *Tithonia diversifolia* en abonos orgánicos: efecto en producción y suelo en Cauca, Colombia. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 15(2), 101-111. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(15\)101-111](https://doi.org/10.18684/BSAA(15)101-111)
- Muñoz, J. M., Muñoz, J. A. y Montes, C. (2015). Evaluación de abonos orgánicos utilizando como indicadores plantas de lechuga y repollo en Popayán, Cauca. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 13(1), 73-82. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(13\)73-82](https://doi.org/10.18684/BSAA(13)73-82)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1996). Producción de alimentos e impacto ambiental. <https://www.fao.org/3/w2612s/w2612s11.htm>
- Pierre, F., Rosell, M., Quiroz, A. y Granda, Y. (2009). Evaluación química y biológica de compost de pulpa del café en caspito municipio Andrés Eloy blanco, estado Lara, Venezuela. *Bioagro*, 21(2), 105-110.
- Puentes, P. A. y Coronado, A. J. (2014). *Determinación de Nitrógeno, Fósforo y Potasio presentes en la poda del cultivo de Proteas Leucadendron, para la futura reutilización en la elaboración de compost*. Corporación Tecnológica de Bogotá.
- Restrepo, J. M., Gómez, J. y Escobar, R. (2014). *Utilización de los residuos orgánicos en la agricultura*. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Fundación para la Investigación y Desarrollo Agrícola (FIDAR).
- Röben, E. (2002). Manual de compostaje para municipios. <http://www.bio-nica.info/biblioteca/Roben2002MaulCompostaje.pdf>
- Román, P., Martínez, M. M. y Pantoja, A. (2013). *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ruiz-Morales, M. (2011). *Taller de elaboración de lombricomposta: porque tener lombrices nos beneficia a todos*. Universidad Iberoamericana Ciudad de México.
- Stack, G., Wolford, R., Scherer, J. y Hawley, M. (2024). El gran escape de la planta. https://web.extension.illinois.edu/gpe_sp/case2/index.html
- Villegas-Cornelio, V. M. y Laines, J. R. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(2), 393-406. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.59>



Universidad
Mariana



Editorial
Unimar

Universidad Mariana
Calle 18 No. 34-104 San Juan de Pasto
<https://libros.umariana.edu.co/index.php/editorialunimar>