

Avances en Ingeniería

y su aporte a la Sostenibilidad



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732

AVANCES EN INGENIERÍA Y SU APOORTE A LA SOSTENIBILIDAD

Comité editorial

Fr. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector

Fr. José Gregorio HERNÁNDEZ TARAZONA, O.P.

Vicerrector Académico

Fr. Héctor Mauricio VARGAS RODRÍGUEZ, O.P.

Vicerrector administrativo y Financiero

María Ximena ARIZA GARCÍA

Directora Ediciones Usta Tunja

Sandra Consuelo DÍAZ BELLO

Directora Unidad de Investigación e Innovación

Juan Carlos CANOLES VÁSQUEZ

Director Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación

ISBN: **978-628-7603-41-7**

Corrección de Estilo:

Fr. Ángel María BELTRAN NARANJO, O.P.

Diagramación:

Bertolt Rafael CANARÍA MARIÑO

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



Ediciones Usta
Universidad Santo Tomás
2022
Departamento Ediciones Usta Tunja
Universidad Santo Tomás Seccional Tunja

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

Ley 23 de 1982.

Avances en Ingeniería

y su aporte a la Sostenibilidad

Autores

Acevedo Suarez, Luis Fernando
Acosta Castellanos, Pedro Mauricio
Castro Ortegón, Yuddy Alejandra
Castro Restrepo, Dagoberto
Daza Pedraza, Andrés Sebastián
Díaz Ariza, Diana Marcela
Dominguez Rave, Maria Isabel
Doria Herrera, Gloria Maria
Franco Soto, Angie Daniela
García Ávila, Carolina
García Castiblanco, Claudia Paola
Grisales Castañeda, David Santiago
Guarín Durán, César Augusto
Jiménez Rojas, Eliana María
Pacheco García, Brigid Hiomara
Parra Ramos, Jeimy Alejandra
Peña García, Julián Armando
Pinzón Muñoz, Carlos Andrés
Posada Mejía, Santiago
Rebollo Barrios, Maria Elena
Ríos Montes, Karina
Rivera, Andrés Felipe
Rodríguez Mesa, Mónica Helena
Salcedo Hurtado, Kellys Nallith
Serna González, Marcela
Silva Cuevas, Helmer Francisco.
Tamayo Restrepo, Isabel
Vargas Salas, Guillermo Eduardo
Vega, Lina Patricia

Editores y Compiladores:

Lina Patricia Vega
Facultad de Ingeniería Ambiental
Universidad Santo Tomás
Tunja - Colombia

Alejandra Castro Ortegón
Facultad de Ingeniería Ambiental
Universidad Santo Tomás
Tunja - Colombia

Pedro Mauricio Acosta Castellanos
Facultad de Ingeniería Civil
Universidad Santo Tomás
Tunja - Colombia

Introducción

El Desarrollo Sostenible hace referencia al bienestar social, la conservación del medio ambiente además de un crecimiento económico acorde a la biocapacidad del ecosistema, promoviendo un modelo de desarrollo que logre la satisfacción de las necesidades de índole social, económico, de diversidad cultural y de un medio ambiente sano, con el fin de contribuir en las condiciones de vida de la población presente sin comprometer el entorno natural de las generaciones futuras¹. En este orden de ideas, es necesario establecer, que los problemas ambientales son inherentes a los procesos de desarrollo modificando los procesos socioeconómicos y dinámicas propias de cada región; generando como elemento esencial para la sostenibilidad alcanzar una interacción entre la satisfacción de las necesidades y aspiraciones humanas, actuales y futuras, con el mantenimiento del equilibrio de los sistemas biofísicos y los sistemas sociales².

Esta preocupación creciente a nivel mundial en las últimas décadas se ha generado al considerar el vínculo entre el desarrollo económico-social y sus efectos inmediatos sobre el ambiente³, permitiendo que los entes gubernamentales generen esfuerzos internacionales como la Agenda 2030, la cual se ha diseñado para lograr un futuro mejor y sostenible para

- 1 Czerny, Serna, & Castro. (2017). *Desarrollo Sostenible ¿Un chance o una ilusión para las periferias?*
- 2 Herrero, L. M. (2000). *Desarrollo sostenible. Transición hasta la coevolución global*. Madrid: Pirámide
- 3 Gomez Gutierrez, C. (2009). *EL DESARROLLO SOSTENIBLE: CONCEPTOS BÁSICOS, ALCANCE Y CRITERIOS PARA SU EVALUACIÓN*.

todos, fomentando alternativas para manejar los principales desafíos a los que se enfrenta la humanidad, reconociendo que la erradicación de la pobreza requiere estrategias basadas en el crecimiento económico asegurando así la protección ambiental y las de necesidades sociales².

Como respuesta a los problemas ambientales que afectan a la humanidad, los estados han identificado que el problema es de orden global y que es necesario atender el problema desde un proceso de cooperatividad internacional, donde se entiende que los efectos negativos trascienden fronteras y rebasan la capacidad de los mismos para solucionarlos, generando consecuencias como la degradación ambiental, la cual se traslada y afecta las condiciones ambientales de otros lugares, requiriendo de esta manera una gestión de los recursos naturales con dimensión internacional⁴.

A partir de este principio y en búsqueda de un bienestar común, los países han desarrollado y participado en la generación de tratados y acuerdos internacionales en los que se han venido estableciendo normas, principios, criterios y una serie de lineamientos normativos, acciones de control y prevención de los daños ambientales, los cuales han estado establecidos en torno al principio de Desarrollo Sostenible, el cual en el informe Brundtland⁵, según Bermejo⁶ lo define como aquel que: *“busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para alcanzar sus propias necesidades”* (p.16). Otras definiciones como la de La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (ONUAA), más conocida como FAO⁷, define el desarrollo sostenible como: *“El manejo y conservación de la base de recursos naturales y la orientación del cambio tecnológico e*

4 Perchinunno, P., Mongelli, L., & Rotondo, F. (2020). A multidimensional approach for the identification of environmental and health wellness territories. *Ecological Indicators*, 110.

5 Brundtland, G. H. (1987). El desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como Biomimesis.

6 Bermejo. (2014). Del Desarrollo Sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como Biomimesis.

7 FAO. (2014). *El Desarrollo Sostenible de las Naciones*.

institucional, de tal manera que asegure la continua satisfacción de las necesidades humanas para las generaciones presentes y futuras” (p.2).

En este orden de ideas, el presente libro producto de una serie de investigaciones, pretende dejar en evidencia desde la tecnología, la innovación y el ejercicio propio de la ingeniería, la identificación de problemas de orden ambiental, social y económico, que afectan la disponibilidad de la oferta de servicios ecosistémicos que provee la naturaleza y que requieren de la formulación de soluciones que busquen generar un impacto positivo desde un enfoque de sostenibilidad, promoviendo así desde el quehacer de los profesionales relacionados con las ciencias ambientales como un equilibrio entre dichas variables y aportando en la garantía de la oferta de los recursos para la satisfacción de las necesidades tanto de las generaciones presentes como de las generaciones futuras.

En el capítulo 1, investigadores de la universidad Santo Tomás presentan un trabajo sobre la implementación de estrategias sostenibles para la protección de caudales ecológicos, en el que analizan los diversos parámetros considerados en las investigaciones como indicadores de las afectaciones al mismo, y los mecanismos implementados para su protección. En los capítulos 2 y 7 se habla de la biorremediación de suelos contaminados con metales. El capítulo 2 presenta una investigación sobre la implementación de hongos micorrízicos arbusculares con la planta *helianthus annuus*, para la biorremediación de suelos contaminados con plomo, en el que se muestra la efectividad de esta asociación en su tratamiento. El capítulo 7 es una revisión en la que se analizaron más de 100 estudios sobre la remediación, de suelos contaminados con plomo y cadmio, por medio de plantas, mostrando las bondades de esta tecnología y la necesidad de generar más investigación y aplicaciones de la misma. El uso de bioenmiendas para la rehabilitación de áreas degradadas por minería de carbón es tratado en el capítulo 3; el capítulo 4 presenta un monitoreo del arbolado urbano del Tecnológico de Antioquia en Medellín; mientras que el capítulo 5 habla sobre el uso de la tecnología de celdas de combustible microbiano en la

que se tratan aguas residuales por medio de microorganismos que a la vez generan energía eléctrica. Un tema muy interesante en relación con el, se da en el capítulo 6 en el que se estudia la relación de los rendimientos financieros y la implementación de estrategias verdes en industrias. En dicho capítulo presenta una investigación realizada en empresas bogotanas en las que se analiza la generación de beneficios financieros derivados del comportamiento o estrategias verdes adoptadas por las mismas. El capítulo 8 habla sobre el patrimonio social y ambiental como herramienta para la planificación territorial en áreas protegidas, en el cual se usó la metodología Corine Land Cover y de diagnóstico rural participativo en el Parque nacional Natural Serranía de las Quinchas de Colombia. El capítulo 9 habla sobre la calidad del aire en Colombia y su relación con la morbilidad y mortalidad por infecciones respiratorias agudas y por COVID 19 mostrando una interesante relación entre ambas mediante la utilización de series de tiempo y análisis multivariado, generando conclusiones para la toma de decisiones de política ambiental y de salud. Por último, el capítulo 10 presenta un estudio realizado sobre el uso de agroquímicos en cultivos y su relación con la salud en agricultores en el departamento de Boyacá Colombia. De esta manera se cubren muy diversos aspectos de los temas relacionados con la sostenibilidad en el manejo de los recursos aire, agua y suelo; de áreas protegidas y de estrategias de biorremediación de suelos y aguas que están a la vanguardia y nos muestran el camino de la investigación hacia el logro de los objetivos del Desarrollo Sostenible.

Tunja, 2 de mayo de 2023

Lina Patricia Vega Garzón

Yuddy Alejandra Castro

Docentes

Universidad Santo Tomás, Tunja - Colombia

Prólogo

Una de las temáticas de mayor trascendencia a nivel global hoy por hoy, es el de la sostenibilidad. Este no se viene tratando solo desde el 2015, año en el cual la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobaron por unanimidad la creación de la agenda hacia 2030 de desarrollo sostenible, la cual cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas¹, sino que podemos irnos más de 60 años atrás cuando la bióloga marina **Rachel Carson** escribió en 1962 la “**Primavera Silenciosa**”. Carson cuenta como un día despierta en primavera y ya no ve las flores crecer y los pájaros cantar, durante esta época del año que es tan significativa para las personas que habitan zonas del planeta con estaciones. Posteriormente en 1968 el Club de Roma y en la primera cumbre de la Tierra en Estocolmo en 1972, se abordó esta temática, que no se veía tan compleja entonces, porque concluían que para el año 2025 se necesitarían dos planetas tierras para la demanda de recursos naturales, pero esta fecha se veía muy lejana en ese momento. Al día de hoy, **Overshoot Day**, el cual es el día que nos consumimos los recursos dispuestos para el año en curso, ya se encuentra en el mes de agosto².

Este breve relato nos lleva a pensar que la sostenibilidad no es solo de grupos ambientalistas, sino que es una temática global y que nos permea a todos los habitantes del planeta tierra, por tal motivo debe de tener una visión holística, en donde la ingeniería

1 <https://www.pactomundial.org/que-puedes-hacer-tu/ods/>

2 <https://www.overshootday.org/>

juega un papel fundamental en el desarrollo de diferentes acciones, propuestas e implementación de actividades en pro de un desarrollo sostenible.

Es por ello que la investigación universitaria interdisciplinaria juega un papel fundamental en el marco de la sostenibilidad, toda vez que se transforma en una sinergia Estado – Academia – Industria, debido a que el estado son todos los ciudadanos que tienen derecho a gozar de un ambiente sano, la industria que debe seguir produciendo de una forma sostenible y la universidad que aplicará sus conocimientos en pro de que estas prácticas sean completamente amigables con el medio ambiente.

De esta manera, el libro “Avances en Ingeniería y su aporte a la sostenibilidad”, se convierte en un escenario propicio para mostrar lo que diferentes grupos de investigación conformados por docentes, estudiantes e investigadores de diferentes regiones de Colombia, vienen efectuando en pro de la sostenibilidad, presentando estudios sobre protección y cuidado de los recursos naturales, caudales ecológicos, economía ambiental, fitorremediación, entre otros, buscando impactar significativamente en nuestro medio.

Por tal motivo, es importante que desde las diferentes Instituciones de Educación Superior (IES) del país, se sigan difundiendo por medio de congresos, seminarios, cursos y de publicaciones de este tipo, lo que se viene realizando en pro de la sostenibilidad.

Medellín, 29 de marzo de 2022

Andrés Felipe Montoya Rendón

Decano Facultad de Ingeniería

Tecnológico de Antioquia IU. Medellín-Colombia

Contenido

- 11 **Capítulo 1:**
Implementación de estrategias sostenibles para la protección de caudales ecológicos
- 61 **Capítulo 2:**
Valoración de la asociación simbiótica entre *Helianthus annuus var. giganteus* y hongos micorrízicos arbusculares en suelos contaminados con plomo
- 95 **Capítulo 3:**
Uso de Bioenmiendas y su Interacción con la Dinámica Bacteriana en la Rizósfera de *Senna atomaria* para la Rehabilitación de Áreas Degradadas por Minería de Carbón.
- 119 **Capítulo 4:**
Monitoreo Del Arbolado Urbano En El Campus Del Tecnológico De Antioquia (Medellín, Colombia)
- 137 **Capítulo 5:**
Las Celdas De Combustible Microbiano Como Estrategia Para El Desarrollo Sostenible
- 161 **Capítulo 6:**
Impacto en los rendimientos financieros de la aplicación de estrategias verdes en las industrias bogotanas
- 193 **Capítulo 7:**
Fitorremediación de Suelos Contaminados con Cadmio y Plomo. Revisión Sistemática

241 **Capítulo 8:**
El patrimonio social y ambiental como herramienta para la planificación territorial de áreas protegidas. Caso de estudio: Parque Natural Regional Serranía de las Quinchas. Boyacá, Colombia

267 **Capítulo 9:**
El Aire que Respiramos los colombianos: Relación Entre Contaminación y Salud de 2010 A 2020 y en Época de Pandemia

321 **Capítulo 10:**
Estudio De La Relación de Uso de Agroquímicos Elaborados a Base de Carbamatos en Cultivos de Cebolla, Con la Salud de Agricultores En El Municipio de Aquitania Boyacá

Capítulo 1

Implementación de estrategias sostenibles para la protección de caudales ecológicos¹

Implementation of sustainable strategies for the protection of ecological flows

¹ Autores:
Jeimy Alejandra Parra Ramos, Pedro Mauricio Acosta Castellanos, Lina Patricia Vega, Yuddy Alejandra Castro Ortegón, Mónica Helena Rodríguez Mesa. Universidad Santo Tomás. Seccional Tunja.

RESUMEN

El caudal ecológico es una variable con mayor afectación sobre el recurso hídrico en diferentes partes del mundo, esto se debe a la influencia del desarrollo humano y la falta de interés por parte de instituciones y comunidades. Es así, como este estudio nace a partir de la revisión sistemática aplicada a 126 artículos procedentes de las bases de datos Scielo y Scopus, donde la clasificación de estos se basó en criterios de semejanza, en torno a impactos y mejora de condiciones actuales del caudal ecológico y la biota acuática. La metodología implementada en este análisis se fundamentó bajo la aplicación de la herramienta *Parsifal*, la cual, facilitó el desarrollo de hipótesis planteadas y por consiguiente, la obtención de resultados de: 1) el principal indicador de afectación sobre el caudal ecológico y la biota acuática, 2) la comparación del grado de vulnerabilidad entre distintos cuerpos de agua 3) Déficit sobre la existencia de mecanismos sostenibles aplicados de forma integral para la conservación de ecosistemas acuáticos. Los resultados que arrojó esta investigación permitieron concluir que los parámetros de alteración, cuerpos hídricos más afectados y mecanismos sostenibles varían conforme a la zona de estudio, debido al cambio sobre las condiciones ambientales nativas.

Palabras clave: Caudal ecológico, Biota acuática, Sostenibilidad, Cuerpo hídrico

ABSTRACT

The ecological wealth is one of the variables with major affectation on the water resource in different parts of the world, this owes principally to the influence of the human development and the absence of interest on the part of institutions and communities. It is like that, since this study is born from the systematical review applied to 126 articles proceeding from the databases Scielo and Scopus, where the classification of the same ones was based on criteria of resemblance, concerning the impacts and the progress of the current conditions of the ecological wealth and the aquatic

biota. Parsifal based the methodology implemented in this analysis under the application of the tool, which, it facilitated the development of the raised hypotheses and consequently, the securing of results about: 1) the principal indicator of affectation on the ecological wealth and the aquatic biota, 2) the comparison of the grade of vulnerability between different bodies of water and 3) the deficit on the existence of sustainable applied mechanisms of integral form for the conservation of aquatic ecosystems. The results that this investigation threw, allowed to conclude that the parameters of alteration, the most affected water bodies and the sustainable mechanisms change in accordance with the zone of study, due to the change on the environmental native conditions of every region.

Keywords: Ecological flow, Aquatic biota, Sustainability, Water body

1. Introducción

El agua como fuente primaria de abastecimiento, no solo para el hombre sino para distintos ecosistemas, representa uno de los recursos naturales más importantes en cuanto al desarrollo biótico y abiótico a nivel global (Westwood et al., 2017). De acuerdo a su composición física, química y biológica, se atribuyen variables de estudio ecológicas, climáticas, hidráulicas, morfodinámicas y demás, las cuales describen el comportamiento del flujo en presencia de distintas alteraciones que a futuro generan graves consecuencias (Qin et al., 2016). La trascendencia de dicho problema está dado por la intervención de actividades productivas provenientes de la industria, crecimiento agropecuario, contaminación por residuos sólidos y vertimientos con altas cargas de compuestos tóxicos (Gleeson & Richter, 2018), que a diario reflejan un aumento en cuanto a la pérdida de ecosistemas naturales en todo el mundo.

Uno de los factores con mayor grado de afectación debido a la exposición a dichos impactos, ha sido el caudal ecológico, en donde la diversidad de especies acuáticas y el desarrollo ecosistémico se ha limitado conforme a la variabilidad de parámetros físicos, químicos y biológicos presentes en el agua (Tibúrcio et al., 2016). Estos parámetros a diario arrojan cifras alarmantes en cuanto a cambios en el ciclo de vida de organismos acuáticos, la disminución de su población en distintos cuerpos de agua y la extinción o modificación morfológica de hábitats terrestres y acuáticos (Y. Wang et al., 2018), así mismo, se

tiene en cuenta que la variabilidad en el flujo ecológico afecta la estructura habitual de los ecosistemas, su composición y distribución a lo largo del tiempo (Chen et al., 2019). Es así como, se obtienen simultáneas descargas de agua que intervienen en el desarrollo y supervivencia de especies en distintos ecosistemas acuáticos, donde existe una alta exposición de características que atribuyen a una estabilidad hídrica sobre todos los cuerpos de agua, limitando el curso normal del flujo ecológico bajo distintos panoramas ecosistémicos (Tsheboeng, 2020).

De igual forma, en diferentes partes del mundo como Asia, Norteamérica y Latinoamérica se ha evidenciado la falta de estrategias para la mitigación de impactos en torno a la gestión del recurso hídrico, información hidrológica e instrumentaria óptima para la evaluación acerca de las condiciones actuales del caudal ecológico (Boavida et al., 2020); simultáneamente, se refleja la carencia de apoyo por parte de las entidades gubernamentales y demás instituciones encargadas de promover y conservar la biodiversidad hídrica en distintos territorios (Gleeson & Richter, 2018). Así mismo, se toma el uso y aprovechamiento hídrico por parte de las comunidades, en donde es evidente la falta de estrategias sociales que intervengan sobre un adecuado manejo del agua (Acosta Castellanos et al., 2020), y conservación de biota acuática, con el objetivo de reducir la escasez de este recurso alrededor de distintas ciudades y ecosistemas acuáticos (Magalhães Junior & Curiel, 2017).

A raíz de lo anterior, se proponen distintos estudios que han buscado determinar mecanismos sostenibles para contribuir a la conservación del caudal ecológico (Yan et al., 2018). Algunos de los mecanismos de evaluación sobre el flujo promueven herramientas de investigación, normatividad, monitoreo y educación formal, los cuales abarcan componentes económicos, sociales y ambientales, tanto en lugares de desarrollo productivo como en zonas de riesgo emergente (Liu et al., 2011). Sin embargo, la aplicación de metodologías se ha visto limitada debido a las

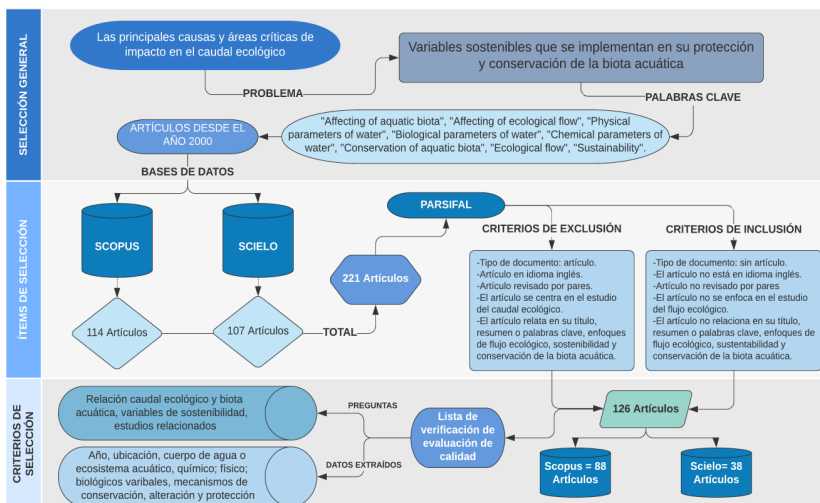
insuficiencias de recolección de información y la dificultad de acceso para la recopilación de estudios en distintas bases de datos (García et al., 2020), de esta manera, surge la necesidad de aplicar procedimientos que sintetizen la información existente acerca del estado actual del flujo ecológico en distintos territorios, ya que, este es un factor indispensable sobre los índices de biodiversidad acuática, interacciones biológicas y procesos ambientales en diferentes regiones naturales.

Conforme a esta problemática, este estudio se propone como una fuente válida de información a nivel global, con el fin de llevar a cabo una revisión sistemática de literatura, en donde se recopilan investigaciones dirigidas a la intervención de factores externos que influyen sobre el flujo y el medio biótico en general. La estrategia aplicada en esta revisión se formuló a través de tres preguntas clave: Q1) ¿Qué variables físico, químicas y biológicas indican alteraciones sobre el caudal ecológico?, Q2) ¿En qué tipo de cuerpos hídricos existe más afectación de especies acuáticas a causa de la variación del caudal ecológico? y, Q3) ¿Qué variables o métodos sostenibles se implementan para establecer mecanismos de rehabilitación sobre el estado actual del caudal ecológico y la biota acuática?; las cuales determinaron información pertinente dentro de cada artículo acerca de las principales causas y zonas críticas de afectación hídrica, permitiendo analizar el objeto de estudio desde enfoques científicos, ambientales y sociales para identificar qué limitaciones existían en el marco investigativo aplicado a la conservación del flujo ecológico y los ecosistemas acuáticos. Igualmente, se asume que el conocimiento detallado de los impactos y efectos de la variabilidad del mismo, son base para discutir y plantear nuevas tecnologías sostenibles, con la capacidad de mantener los procesos productivos y validar los requisitos necesarios para la protección del flujo en cuerpos de agua, estableciendo así, un desarrollo justo con énfasis en la seguridad hídrica y ecológica (X. Wang et al., 2015).

2. Método

El presente estudio surge con el fin de determinar las principales causas y zonas críticas de afectación sobre el caudal ecológico, para conocer las variables sostenibles que se implementan en su protección y conservación de la biota acuática, de forma que, es importante una revisión sistemática de información para seleccionar artículos enfocados en dar respuesta a lo anteriormente propuesto; dicha revisión, favoreció la recopilación de datos por medio de un sistema de selección. Las siguientes secciones describirán la obtención, clasificación y análisis de los artículos recopilados.

Diagrama 1. Desarrollo metodológico de la revisión sistemática



2.1 Obtención de artículos

Las bases de datos seleccionadas para la búsqueda de artículos fueron "Scielo" y "Scopus" debido a, su gran recopilación de estudios e investigaciones alrededor del mundo, en comparación

con otras bases de datos, donde el acceso a documentos es limitado (Thürer et al., 2018). De igual forma, para obtener un número representativo de artículos e información de calidad, se establecieron criterios de búsqueda, destacando los artículos en idioma inglés con los siguientes sinónimos dentro de su título, resumen o palabras claves: “Afectación de biota acuática”, “Afectación del caudal ecológico”, “Parámetros físicos del agua”, “Parámetros biológicos del agua”, “Parámetros químicos del agua”, “Conservación de biota acuática”, “Caudal ecológico”, “Sustentabilidad”. En seguida, se generó una restricción para recopilar solo artículos publicados desde el año 2000 hasta la actualidad, recuperando así un total de 221 artículos.

2.2 Selección de artículos

A partir de la muestra original de 221 artículos importados al software *Parsifal*, fue necesario implementar otro filtro de selección, a fin de extraer de forma definitiva aquellos que no aportaban datos relacionados con la revisión, de esta forma, en la *Tabla 1* se observan los criterios implementados.

Tabla 1. Criterios de inclusión y exclusión de artículos en el software Parsifal.

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
a. Tipo de documento: artículo.	a. El documento no es un artículo.
b. Artículo en idioma inglés.	b. El artículo no está en idioma inglés.
c. Artículo revisado por pares.	c. Artículo no revisado por pares.
d. El artículo se centra en el estudio del caudal ecológico.	d. El artículo no se centra en el estudio del caudal ecológico.
e. El artículo relaciona en su título, resumen o palabras clave, enfoques hacia el caudal ecológico, sostenibilidad y conservación de biota acuática.	e. El artículo no relaciona en su título, resumen o palabras clave, enfoques hacia el caudal ecológico, sostenibilidad y conservación de biota acuática.

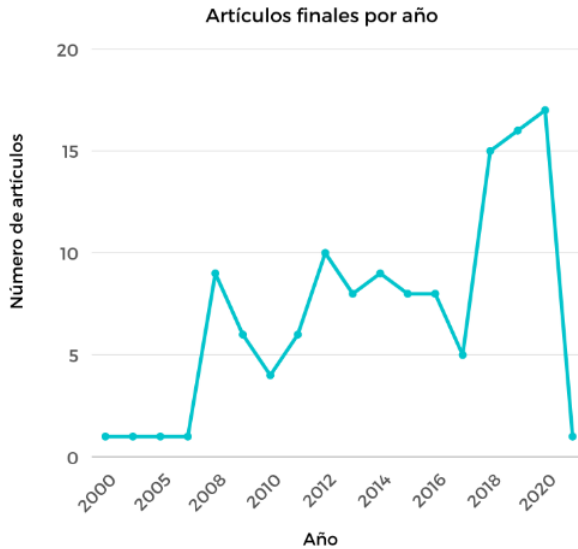
Posterior a esta selección, se descartaron 69 artículos de la base de datos “Scielo” y 26 artículos de la base de datos “Scopus”, obteniendo de manera definitiva una de 126 artículos compuestos de 38 artículos de la base de datos “Scielo” y 88 artículos de la base de datos “Scopus”, como se observa en la *Tabla 2, Anexo 1*. En seguida, estos artículos se clasificaron mediante una lista de verificación de evaluación de calidad, empleando una serie de preguntas relacionadas con el tema a estudiar y asignando puntajes de 1.0 “Sí”, 0.5 “Parcialmente” y 0.0 “No”. Dichas preguntas permitieron el reconocimiento de aquellos artículos con más enfoque sobre el caudal ecológico o biota acuática y por último, se registró un formulario de extracción de datos con el fin de recopilar estadísticas necesarias para el posterior análisis de los artículos.

3. Resultados

Los resultados obtenidos a partir de la revisión sistemática, dan respuesta a las preguntas Q1, Q2 y Q3 expuestas anteriormente, donde, en cada apartado se realizará un análisis profundo de la información contribuida por los artículos seleccionados y de igual forma, se evidenciará la compilación de estadísticas sobre la distribución investigativa en torno a cada hipótesis por medio de tablas comparativas.

3.1 Análisis de artículos

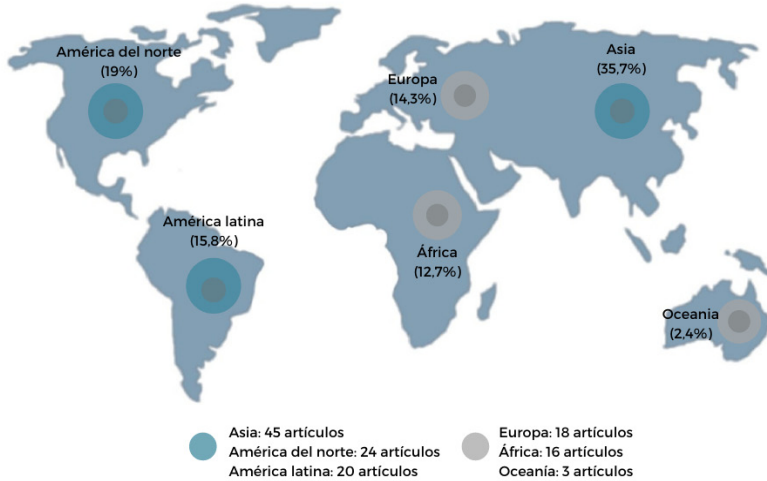
Gráfico 1. Distribución total de artículos por año.



Durante un periodo de 21 años, los artículos seleccionados demostraron un comportamiento en función creciente, expresando un avance en las investigaciones desarrolladas sobre el caudal ecológico y su influencia sobre la biota acuática. De acuerdo con el *Gráfico 1*, se confirma que, el 38% de los artículos se publicaron durante el año 2018 y 2020, siendo documentos con información histórica en cuanto a la descripción de las primeras metodologías implementadas para el estudio del flujo ecológico, adoptando dichos datos para la aplicación de estudios actuales sobre distintos focos de afectación.

Figura 1. Distribución total de artículos según ubicación geoFigura.

Distribución de búsqueda por continentes



Igualmente, por medio de *Figura 1* se evaluó la distribución de los artículos por continentes, indicando una mayor investigación en Asia, sin embargo, Oceanía representó al continente con menos estudios relacionados sobre el caudal ecológico. Así mismo, Latinoamérica se encuentra en tercer lugar con un promedio de 20 artículos a lo largo del período analizado, lo que, respecto al total de documentos, significa un 16% de participación en cuanto a la temática estudiada. Finalmente, durante esta fase se extrajo la información más relevante de cada uno de los artículos seleccionados, para proceder a conceptualizar y dar respuesta a las preguntas orientadoras Q1, Q2 y Q3 de esta revisión.

3.2 Análisis de literatura

3.2.1 Q1: ¿Qué variables físicas, químicas y biológicas indican alteraciones sobre el caudal ecológico?

Las variables físicas, químicas y biológicas son determinantes al evaluar la calidad de agua sobre el flujo ecológico, gracias a que, estiman la condición actual del recurso para establecer programas de gestión, con enfoque integrado a la conservación de comunidades acuáticas. Por lo anterior, entender qué variables indican una alteración sobre el caudal ecológico coopera a la cuantificación de impactos y asimismo, contribuye a definir estrategias de control para mitigar de forma puntual dichas problemáticas (García De Jalón, 2008).

3.2.1.1 Parámetros físicos

A través de la *Tabla 3*, se puede observar que la temperatura fue la variable más estudiada en comparación a las demás, representando un 59,5% de los artículos. Así mismo, los sólidos manifestaron ser la variable con menor investigación a lo largo de esta revisión, representando un 11,9% de los artículos relacionados con parámetros físicos.

Tabla 3. Parámetros físicos relacionados en los artículos

Variables físicas	Número de artículos *	Porcentaje (%)
Temperatura	25	59,5
Salinidad	6	14,2
Turbidez	6	14,2
Sólidos (ST, SST, SS)	5	11,9

**Se adopta un total de 42 artículos enfocados al estudio de parámetros físicos.*

a. Temperatura

Aproximadamente, 25 de 31 estudios en donde se realizaron análisis de parámetros físicos, corroboraron que el cambio de temperatura en el agua a razón de la disminución del flujo, se originaba por factores como las temporadas cálidas, extracciones mineras, cambio climático precipitado (Rivers et al., 2008) y los grandes niveles de polución de contaminantes (Guerra et al., 2016). Así mismo, las fluctuaciones de temperatura se vinculan directamente con las respuestas bióticas de distintos organismos dentro del cuerpo de agua, proporcionando variables de cambio en su comportamiento y afectación del ciclo de vida (V. C. Da Rosa & Garcia, 2015). Por lo anterior, los estudios mencionados cuestionaron las implicaciones ecológicas, ocasionadas por la oscilación de la temperatura en especies acuáticas, obteniendo que, la organización dentro del espacio hídrico (Principe et al., 2019), la fluctuación sobre tasas de crecimiento y mortalidad (V. C. Da Rosa & Garcia, 2015), desarrollo metabólico (Souza-Cruz-Buenaga et al., 2019), presencia/ausencia de individuos en el curso de agua (Tibúrcio et al., 2016), zonas aptas de proliferación (G. Tan et al., 2018; Zhang et al., 2018) y aumento en el requerimiento de oxígeno (McKenna, 2019) no expresaban condiciones óptimas para el mantenimiento del hábitat acuático, cuando la temperatura variaba bruscamente.

b. Salinidad

Adicionalmente, se encontró que, en 6 de 31 estudios evaluados, el comportamiento de la salinidad y conductividad en el agua fluctuaba conforme a dos factores. El primer factor, relaciona la variabilidad de los parámetros nombrados con la proporción del flujo; en donde a mayor flujo, menor salinidad y conductividad. De acuerdo a (Sousa & Freitas, 2008), en el caso del lago Jacaré en Brasil durante las inundaciones evidenció que el nivel de conductividad en el agua fue de $0.016 \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ a $0.027 \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$, en comparación a los valores durante épocas de sequía, los cuales fueron de $0,011 \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ a $0,042 \mu\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ (Sousa & Freitas, 2008)

En segundo lugar, la salinidad determina condiciones necesarias para la presencia y distribución de comunidades acuáticas, de modo que, (Aragón-Noriega & Calderón Aguilera, 2000), desarrolló un modelo de predicción de salinidad para evaluar la expansión del hábitat del camarón azul al exponerse a bajos niveles de condiciones salinas en las lagunas costeras de Sinaloa, teniendo acceso a más alimento y zonas de protección. Dichos comportamientos descritos anteriormente, expresan un patrón biológico donde la proporción del flujo y los niveles de salinidad son indispensables para el mantenimiento de ecosistemas (Aragón-Noriega & Calderón Aguilera, 2000).

c. Turbidez

Así mismo, 6 de 31 artículos indicaron que la turbidez, es un criterio que tiende a aumentar en estaciones húmedas debido al aporte elevado de sedimentos, procedentes de la erosión por periodos de sequía (Araújo et al., 2013). Por otro lado, los niveles bajos de turbidez indican un buen estado sobre la calidad del agua, en comparación a los valores que se obtienen con la presencia de zonas urbanas o zonas de actividad productiva, donde el flujo ecológico sufre un alto grado de exposición por las mismas (Walsh & Wepener, 2009). La turbidez también se considera un referente de concentración de iones (Da Silva et al., 2019) e indicador biológico, puesto que, Leite (2016) al estudiar los especímenes de *Biomphalaria* concluyó que, estos y otros caracoles residen en condiciones donde la turbidez es medio alta, con el propósito de definir los requerimientos óptimos de vivencia y zonas de reproducción (Leite et al., 2016).

d. Sólidos y sedimentos

Por otro lado, es necesario tener en cuenta a los sólidos o sedimentos presentes en el flujo ecológico, los cuales se ven directamente vinculados con fuentes antropogénicas según lo descrito en 5 de 31 artículos. (Mantel et al., 2010) en su investigación llevada a cabo en los arroyos de grava cercanos

al Cabo Occidental presente en Sudáfrica, registró un aumento en los valores de TDS en proporción con el aumento de sales, atribuyendo este cambio a la presencia de presas vinculadas con actividades agrícolas (Mantel et al., 2010), por este motivo, se demuestra que dicha variable es un indicador confiable al momento de determinar factores de contaminación sobre el flujo ecológico (Rosin et al., 2009), siendo en algunos casos una limitante para la comunidad acuática (Simões et al., 2012) o por el contrario una condición ideal para los invertebrados acuáticos (Weerts & Cyrus, 2008).

3.2.1.2 Parámetros químicos

A través de la *Tabla 4*, se puede observar que el oxígeno disuelto fue la variable más estudiada en comparación a las demás, representando un 29,4% de los artículos. Así mismo, la DQO y DBO manifestaron ser las variables con menor investigación a lo largo de esta revisión, representando un 11,6% de los artículos relacionados con parámetros químicos.

Tabla 4. Parámetros químicos relacionados en los artículos.

VARIABLES QUÍMICAS	NÚMERO DE ARTÍCULOS*	PORCENTAJE (%)
Oxígeno disuelto	10	29,4
pH	6	17,6
Nitritos y nitratos	4	11,7
Fosfatos y fósforo	4	11,7
Metales o metaloides	3	8,8
Iones	3	8,8
DQO	2	5,8
DBO	2	5,8

**Se adopta un total de 34 artículos enfocados al estudio de parámetros químicos.*

a. Oxígeno disuelto

Conforme a la *Tabla 3*, 10 de 34 estudios atribuyen la cantidad de oxígeno disuelto y la carga de sustancias orgánicas de origen biodegradable, a las aguas de tipo doméstico, industrial y demás vertimientos, ocasionando niveles bajos de oxígeno en el flujo ecológico (Souza-Cruz-Buenaga et al., 2019). Igualmente, la disminución de oxígeno en el flujo se representa por el contacto con la llanura aluvial, generando un aumento en los índices de mortalidad de distintos grupos de peces (Alho, 2008), este fenómeno se ocasiona debido a la alteración irregular sobre el caudal ecológico durante diferentes ciclos hidrológicos. Por ejemplo, en el lago Jacaré en Brasil se demuestra la influencia del OD en la comunidad acuática, donde las bajas concentraciones de oxígeno ($0,41 \text{ mg.l}^{-1}$ y $2,76 \text{ mg.l}^{-1}$, durante inundaciones y $1,50 \text{ mg.l}^{-1}$ a $4,50 \text{ mg.l}^{-1}$, durante sequías) y la falta de espacio, generó estrés y por consiguiente, la disminución de ejemplares por comportamientos de depredación (Sousa & Freitas, 2008). Por lo anterior es claro decir que la variabilidad de oxígeno afecta directamente a las comunidades acuáticas a lo largo de su ciclo de vida, y por ende repercute sobre su estabilidad física.

b. pH

Igualmente al analizar el pH, 6 de 34 estudios afirmaron su importancia al evaluar la calidad del agua, en donde se estableció de manera general, un cambio sobre los valores de pH cuando el flujo del caudal ecológico se mantenía fijo o variable durante la estación seca (Castro et al., 2013). De esta forma, (Sousa & Freitas, 2008) en su investigación registró qué, en el lago Jacaré en Brasil durante las épocas de inundación el pH arrojó valores entre 6,13-7,43 y durante los períodos de sequía arrojó valores entre 5,29 - 7,51 (Richter & De Sousa, 2019), aclarando que el pH debe asumirse como una variable indispensable durante los eventos hidrológicos, ya que, su asimilación por parte de distintos organismos varía notablemente.

c. Nitritos, nitratos y fosfatos

En tercer lugar, se encuentran elementos como el nitrógeno y fósforo, los cuales desempeñan un papel importante en la caracterización del agua, ya que por su composición dan lugar a la formación de nitritos, nitratos y fosfatos; en efecto, 4 de 34 estudios arrojaron información acerca de su comportamiento sobre el flujo ecológico en distintos afluentes. Por ejemplo, (Nyamangara et al., 2013) realizó un estudio en el río Manyame de Sudáfrica, donde vinculó la variabilidad de estos compuestos a distintas estaciones climáticas, confirmando niveles elevados de los mismos durante períodos húmedos y niveles bajos durante tiempos de sequía (Nyamangara et al., 2013). De forma semejante, la presencia de nitritos, nitratos y fosfatos se atribuyó a aguas procedentes de zonas urbanas, industriales (Upadhyay et al., 2011) y agrícolas, lo que indica un deterioro en las fuentes hídricas, y medio ambiente en general (Walsh & Wepener, 2009).

d. DQO, DBO y metales pesados

En el caso de la DQO y DBO, solo 2 de 34 estudios reportaron un análisis en relación con el flujo ecológico, asociando dichos parámetros al desarrollo industrial cerca del curso hídrico. De esta forma, en los ríos Crocodile y Magalies en Sudáfrica, se observó un aumento de 2mg/l a 17mg/l de DQO debido al cambio de estaciones sobre períodos secos y húmedos en simultáneo a la disminución de oxígeno disuelto por actividades productivas (Walsh & Wepener, 2009). Caso similar al del río Yamuna en Delhi, donde la DQO aumentó hasta 12 mg/l, y la DBO registraba valores de 22,8 mg/l y 18,6 mg/l, reflejando una deplorable condición en la calidad del flujo (Upadhyay et al., 2011).

Finalmente, 3 de 34 estudios demostraron que la dispersión de metales pesados en el flujo ecológico se relacionaba con altos niveles de contaminación hídrica, así lo expone (Da Silva et al., 2019) donde en su investigación reportó valores de Cu en el río Tigris y Cd, Cu y Zn en el río Shing Mun en Asia, a causa de plantas

mineras, industrias artesanales y agrícolas. Del mismo modo, otros elementos químicos como Cr, Hg, Pb, As, Ni, Mn y Fe se encuentran en el agua de forma moderada y severa expresando niveles de contaminación con impacto ecológico (Da Silva et al., 2019), interfiriendo perjudicialmente a los hábitats de plantas ribereñas (Nyamangara et al., 2013).

3.2.1.3 Parámetros biológicos

A través del *Tabla 5*, se puede observar que los peces fueron la variable más estudiada en comparación a las demás, representando un 48% de los artículos. Así mismo, los mamíferos, reptiles y aves manifestaron ser las variables con menor investigación a lo largo de esta revisión, representando un 1,9 % de los artículos relacionados con parámetros biológicos.

Tabla 5. Parámetros biológicos relacionados en los artículos.

Variables biológicas	Número de artículos*	Porcentaje (%)
Peces	25	48
Macroinvertebrados	12	23
Plantas	12	23
Microorganismos patógenos	2	3,8

**Se adopta un total de 52 artículos enfocados al estudio de parámetros biológicos.*

a. Peces

Los parámetros biológicos involucran a los organismos y su dinámica de desarrollo al interior del cuerpo de agua. Por tal motivo, 25 de 52 estudios a cerca de peces, reportaron codificaciones de presencia/ausencia en ejemplares acuáticos, siendo el caso de (Araújo et al., 2013), en el río Paraíba do Sul presente en Brasil, donde registró especies como *Leporinus copelandii*, *Prochilodus lineatus*, *Pimelodus fur*, *Hoplias malabaricus*, *Geophagus brasiliensis*, *Rhamdia quelen* y *Hoplosternum littorale*, a causa de la variación del caudal y la

transición entre la estación húmeda y la estación seca de la zona (Araújo et al., 2013), concluyendo que dichas especies se adaptan a condiciones ambientales existentes para definir el uso racional de hábitats y así, satisfacer las necesidades básicas de cada individuo (da Costa et al., 2015)

b. Macroinvertebrados

Por otra parte, los macroinvertebrados son organismos determinantes en el análisis de calidad del agua, ya que presentan una amplia sensibilidad frente a cambios en las condiciones físico-químicas, régimen del flujo e integridad morfológica de un cuerpo de agua (Larsen et al., 2019). Dicho esto, 12 de 52 estudios, han evaluado esta función destacable de los macroinvertebrados, llegando a concluir que son capaces de generar más respuestas biológicas en comparación a los peces (Patterson et al., 2017). Siendo el caso de algunas especies de *Chironomidae*, las cuales, pueden sobrevivir en condiciones donde las tasas de oxígeno son bajas, adhiriéndose en sedimentos con el fin de evitar impactos ecológicos (Butakka et al., 2014), mientras que, otros insectos bentónicos resisten altas concentraciones de sólidos suspendidos, nitritos, nitratos, aceites y sales (Guerra et al., 2016). En su mayoría, la disminución poblacional de dichas especies se debe a las diferencias de flujo entre la estación húmeda y la estación seca, como el caso de los *Hydropsychidae*, *Simuliidae* (Castro et al., 2013), *Alluroididae*, *Enchytraeidae* y *Naididae* presentes en arroyos, lagos y demás fuentes hídricas (V. C. Da Rosa & Garcia, 2015).

c. Plantas

Las plantas son empleadas como otro tipo de bioindicador para identificar la alteración del caudal ecológico, ya que permiten definir la variabilidad y calidad del afluente en cada zona de estudio, por lo anterior, 12 de 52 artículos evidenciaron su comportamiento, relacionando que su presencia/ausencia se utiliza para predecir la periodicidad, volumen, magnitud y

duración del flujo (Butakka et al., 2014; Westwood et al., 2017) o cuantificar niveles de material orgánico, contaminación y composición en el sustrato del suelo (V. C. Da Rosa & Garcia, 2015; Guerra et al., 2016). Por ejemplo, (Vorwerk et al., 2008) afirma que el zooplancton presenta un incremento en su población entre 1 864 individuos m^{-3} y 5 780 individuos m^{-3} cuando el flujo en el estuario del Suroeste de África es elevado, relacionándolo con la disponibilidad de alimentos en la zona (Vorwerk et al., 2008), al igual que las diatomeas, donde se confirmó que estas son un indicador de salud ecológica y contaminación acuática, desempeñando un papel importante en cuanto a la cuantificación de pH, nitrógeno, nivel trófico, oxígeno, salinidad, fósforo, conductividad, eutrofización y nutrientes dispersos en el agua (Walsh & Wepener, 2009).

d. Otros

En seguida, los microorganismos patógenos más relevantes se destacan en 2 estudios, los cuales se definen como indicadores de entradas de agua residual en los afluentes. (Souza-Cruz-Buenaga et al., 2019) a través de su análisis sobre la transmisión de enfermedades propagadas por medio del agua, detalló un exceso de nitrógeno, fósforo y materia orgánica vinculado a la rápida proliferación de microorganismos perjudiciales y coliformes fecales (Souza-Cruz-Buenaga et al., 2019). Uno de los métodos más relevantes para el estudio de bacterias presentes en el agua, fue propuesto por (Knight et al., 2014) llevando a cabo un muestreo de colonias compuestas por coliformes totales y fecales, las cuales fueron recolectadas en el río Yamuna de Delhi, obteniendo un recuento de 1,0104 coliformes / 100 ml en 2005, y 5,2103 coliformes / 100 ml en 2011 (Knight et al., 2014) evidenciando un aumento en los mismos a medida que incrementaban los vertimientos de agua residual sobre el lecho del río.

3.2.1.4 Otros factores de alteración

A través del *Tabla 6*, se puede observar que las alteraciones climáticas fue la variable más estudiada en comparación a las demás, representando un 35,2% de los artículos. Así mismo, las causas geomorfológicas manifestaron ser las variables con menor investigación a lo largo de esta revisión, representando un 4,9% de los artículos relacionados con otros parámetros de alteración.

Tabla 6. Otras causas de alteración del caudal ecológico relacionadas en los artículos.

Otras variables	Número de artículos*	Porcentaje (%)
Alteraciones climáticas	43	35,2
Megaestructuras	43	35,2
Actividades productivas	23	18,8
Cambio climático	7	5,7
Causas geomorfológicas	6	4,9

**Se adopta un total de 122 artículos enfocados al estudio de otros parámetros de alteración.*

a. Alteraciones climáticas

En primer lugar sobresalen las alteraciones climáticas y cambios repentinos en los registros históricos de precipitación, donde 43 de 122 estudios corroboraron que la variación sobre el flujo ecológico se originaban en gran medida por dichas alteraciones (Mwedzi et al., 2016), las cuales se reflejan en una prolongación de periodos húmedos y secos, ocasionando cambios en los patrones para el transporte de nutrientes, materia orgánica y otros componentes, generando impactos por sedimentación, erosión (Martínez et al., 2011), eutrofización y por ende, escasez en el recurso hídrico (Park et al., 2020). Cabe aclarar, que varias de las implicaciones anteriormente nombradas, se derivan por acciones del cambio climático, en especial el aumento de

temperatura, donde se ocasiona una afección progresiva hacia distintos grupos de organismos, ecosistemas e igualmente cuerpos de agua, dificultando así las dinámicas ecológicas y desempeño morfológico en los mismos (Tsheboeng, 2020).

b. Megaestructuras

Por otra parte, 43 de 122 estudios contradijeron el funcionamiento de las presas, a causa de los serios impactos generados en los cuerpos hídricos, especialmente sobre el incremento del caudal mínimo y la disminución del caudal medio, dando como consecuencia cambios significativos sobre el régimen hidrológico habitual (Dallas & Rivers, 2014). Además, se manifiestan cambios en las condiciones térmicas y químicas del agua (Castro et al., 2013), en donde se afecta el desarrollo óptimo de especies acuáticas, el desove, las rutas migratorias para reproducción, provisión de alimentos (J. Li et al., 2019) y el de desplazamiento de especies endémicas por la llegada de especies migratorias (Araújo et al., 2013). Lo anterior confirma que, las presas perjudican componentes como frecuencia, magnitud y régimen del flujo, necesarios para el equilibrio ecosistémico.

c. Actividades productivas

Finalmente, el creciente desarrollo humano ha traído consigo la expansión de fronteras urbanas, ocasionando una propagación y aumento de actividades productivas que requieren de la explotación de recursos naturales, en especial del agua, para suplir las necesidades esenciales para el hombre. Por lo anterior, la composición de distintos cuerpos de agua se ha visto amenazada (Chen et al., 2019), a causa de efectos como la inestabilidad, el ineficiente mantenimiento y falta de conservación de flujos ecológicos, ligados a la rápida escasez de agua y la modificación en el uso del suelo (Larsen et al., 2019).

3.2.2 Q2: ¿En qué tipo de cuerpos hídricos existe más afectación de especies acuáticas a causa de la variación del caudal ecológico?

Los ecosistemas o cuerpos hídricos pueden ser estudiados o monitoreados desde múltiples ópticas y escalas de tiempo y espacio. De acuerdo a esto, dicha información acerca de su dinámica en torno a la variabilidad del flujo ecológico, ayuda a la rápida identificación de los afluentes más alterados (Pantoja, 2017). Por consiguiente, el análisis de esta pregunta problema, es la base teórica para establecer qué mecanismos de protección o conservación de recursos hídricos y ecológicos deben aplicarse sobre los ecosistemas acuáticos.

A través del *Tabla 7*, se puede observar que los ríos fue la variable más estudiada en comparación a las demás, representando un 67,5% de los artículos. Así mismo, los estuarios manifestaron ser la variable con menor investigación a lo largo de esta revisión, representando un 2,5% de los artículos relacionados.

Tabla 7. Cuerpos hídricos relacionados en los artículos.

Cuerpo de agua	Número de artículos*	Porcentaje (%)
Ríos	54	67,5
Arroyos	16	29
Humedales	5	6,2
Lagos/Lagunas	3	3,7
Estuarios	2	2,5

**Se adopta un total de 80 artículos enfocados al estudio de cuerpos hídricos.*

3.2.2.1 Ríos

En cuanto al análisis de cuerpo hídricos, 54 estudios enfocaron sus diagnósticos hacia ríos, afirmando que el caudal es uno de los factores con mayor influencia al momento de determinar las condiciones en el funcionamiento y comportamiento de especies presentes en el agua (Mantel et al., 2010). La investigación realizada por (Theodoropoulos et al., 2019) demostró que las condiciones óptimas de vida eran el resultado de las características hidráulicas del lecho ribereño, por ejemplo,

la cucaracha limnofílica estaba presente en tramos profundos donde el flujo mantenía velocidades bajas y el pez Evrotas prefería hábitats medianamente profundos con bajas velocidades, sin embargo a diferencia de estas especies el pez cacho pequeño se acoplaba a profundidades bajas donde el flujo presentaba altas velocidades (Theodoropoulos et al., 2019), donde el impacto de la variabilidad de flujo y condiciones de hábitat también se refleja durante distintas etapas de crecimiento del organismo (Boavida et al., 2020) De este modo, los bioindicadores pueden ser un referente de los hábitats más influenciados en los ríos, proporcionando un grado de salud ecológica frente a los eventos de alteración (Carolli et al., 2021).

3.2.2.2 Arroyos

De forma semejante, se relacionan los arroyos o quebradas como otro tipo de cuerpo hídrico, el cual a comparación del río, varía en cuanto a la cantidad de flujo y riqueza de algunos organismos acuáticos, habitado en su mayoría por macroinvertebrados, macrófitas y peces pequeños (B. F. J. V. Rosa et al., 2015). De esta forma, 16 estudios corroboraron la importancia de los arroyos como zonas capaces de proporcionar protección, refugio y alimento para conservar las condiciones bióticas y abióticas de distintos hábitats (Tibúrcio et al., 2016). (Patterson et al., 2017) en su análisis sobre hábitats de arroyos, llevó a cabo un monitoreo de ecodéficit para formaciones de rifle, rifle-run y piscinas, donde la agrupación de rifle y rifle-run obtuvo un ecodéficit pequeño (2,2%) indicando un bajo impacto antropogénico, mientras que las piscinas obtuvieron un ecodéficit más elevado (4,5%), encontrándose presencia de zonas urbanas y cultivos; lo anterior, provocó una disminución en la calidad de arroyos con gran impacto en la comunidad de peces y macroinvertebrados contribuyendo al estrés y mortalidad de especies acuáticas (Patterson et al., 2017).

3.2.2.3 Humedales

Los humedales, al igual que los ríos, son cuerpos de agua que acogen diversos hábitats siendo referentes de biodiversidad y servicios ecosistémicos, no obstante, protagonizan numerosas afectaciones por parte de avances socioeconómicos. De tal forma, 5 estudios evaluaron el desarrollo de actividades poco sostenibles dentro de diferentes humedales a nivel mundial, evidenciando que los impactos más relevantes son generados a través de prácticas agropecuarias, mineras, turísticas y urbanas. Por ejemplo, El Pantanal ubicado en Brasil, ha disminuido su área en un 17% debido a la expansión de fronteras agrícolas, ocasionando pérdidas invaluable de vida silvestre con una tasa de degradación ambiental de 2.3% al año (Alho, 2008), así mismo, (Y. yi Tan et al., 2012), afirma que, en el humedal Zoige ubicado en China se presencié una degeneración en el suelo, debido a un incremento del 62,52% en actividades de pastoreo intensivo (Y. yi Tan et al., 2012). Estos valores simbolizan vulnerabilidad y estrés sobre el caudal ecológico, retrasando el desarrollo óptimo de hábitats y ecosistemas dentro de los humedales (Talukdar et al., 2020).

3.2.2.4 Estuarios

Por último, uno de los cuerpos de agua con más afectación en torno a la variabilidad climática es el estuario, ya que, el aumento de temperatura, cantidad de precipitación y actividades productivas representan mal uso del suelo, contaminación, alteraciones en los valores de salinidad, deforestación y reducción del caudal ecológico. Del mismo modo, (Martínez et al., 2011), a lo largo de su estudio sobre los estuarios de la costa de México, corrobora que distintos grupos de peces han restringido su distribución en la columna de agua a causa de la pesca intensiva y agotamiento de oxígeno disuelto, lo cual expone el escaso control ambiental en estos cuerpos de agua, estimándose escenarios con incontables pérdidas de hábitat costero (Martínez et al., 2011).

3.2.3 Q3: ¿Qué variables o métodos sostenibles se implementan para establecer mecanismos de rehabilitación o refuerzo sobre las condiciones del caudal ecológico y la biota acuática?

Actualmente, las alteraciones de origen natural y antropogénico producidas sobre el caudal ecológico en han reflejado múltiples impactos en la comunidad acuática, sin embargo, se ha requerido de la aplicación de distintas investigaciones para determinar mecanismos o herramientas de conservación del flujo y biota acuática, de forma que, el recurso hídrico restaure sus condiciones naturales y pueda ser ecológicamente saludable. A través de la *Tabla 8*, es posible evidenciar el porcentaje de influencia de cada mecanismo analizado sobre la conservación de biota acuática, resaltando, la investigación con un 44,6% de influencia, mientras que, el mecanismo menos investigado fue la normatividad con un 3,5%.

Tabla 8. Mecanismos para la conservación de biota acuática

Cuerpo de agua	Número de artículos*	Porcentaje (%)
Investigación	25	44,6
Restauración de ecosistemas	11	19,6
Monitoreo	10	17,8
Áreas protegidas	8	14,2
Normatividad	2	3,5

**Se adopta un total de 56 artículos enfocados a los mecanismos para la conservación de biota.*

3.2.3.1 Mecanismos para la conservación de biota acuática

Mecanismo	Descripción
<i>Investigación</i>	Es preciso señalar que, 25 artículos establecieron un vínculo directo en realizar estudios e investigaciones que describan con mayor claridad los componentes del hábitat acuático (Liu et al., 2011). De tal forma, las estadísticas recopiladas en cada documento de investigación garantizarán un enfoque integral a cerca de la biodiversidad acuática y el caudal ecológico requerido para su desarrollo (Butakka et al., 2014; Christos Katopodis, 2005). En adición, el modelamiento y simulación ambiental permite cumplir con el análisis de las dinámicas ecológicas, aplicando en su mayoría modelos de hábitat o balance hídrico, mismos que, por medio de conjunto de datos ecológicos, dan como resultado la imitación de las condiciones ideales sobre el flujo ecológico para el mantenimiento de organismos acuáticos (Qin et al., 2016)
<i>Restauración de ecosistemas</i>	Restaurar de manera parcial o total las características de un ecosistema o flujo ecológico, asegura la integridad de la comunidad acuática, favoreciendo su permanencia y crecimiento (da Costa et al., 2015) Para cumplir con este objetivo, 11 estudios plantean la necesidad de proyectar alternativas que permitan una gestión eficiente con énfasis en acciones de recuperación y resiliencia del hábitat, estas acciones en conjunto con otras metodologías, garantizarán un mantenimiento de la biodiversidad y, por ende, una calidad hídrica aceptable para el desarrollo de grupos acuáticos.
<i>Monitoreo</i>	La variabilidad del caudal ecológico se adopta como un agente poco predecible y difícil de comprender, puesto que, 10 estudios analizaron la implementación de monitoreos para recrear panoramas temporales y comparativos y así describir las condiciones regulares del caudal (Castro et al., 2013; Pedone-Bonfim et al., 2018). En este sentido, la biota debe incluirse en todos los planes de monitoreo realizados sobre cuerpos de agua, a fin de obtener medidas integrales para la toma de decisiones sobre su condición (Weerts & Cyrus, 2008); dichos procesos deben realizarse con la participación de entes gubernamentales, centros de investigación y distintos profesionales, para que se fortalezca de manera holística los proyectos de conservación y gestión de hábitats acuáticos (Martínez et al., 2011).

Áreas protegidas	Sin lugar a dudas, determinar áreas de protección ecosistémica e hídrica genera espacios para mejorar el comportamiento de sucesos ecológicos, de tal forma que, 8 estudios aseguran que la permanencia de especies acuáticas dentro de zonas de amortiguamiento es un mecanismo indispensable (Haas et al., 2014; Roets et al., 2008). Lo anterior desencadena diferentes prácticas para cumplir los objetivos propuestos, de modo que, se entable una conectividad ecológica para salvaguardar la vida de especies nativas, evitando efectos adversos sobre las características del agua, flujo de nutrientes y depuración de contaminantes (McKenna, 2019), para así, asegurar un futuro saludable y sostenible para las comunidades acuáticas (Beaton & Bradford, 2013).
<i>Normatividad</i>	Al relacionar parámetros ecológicos con políticas de protección y conservación de fuente hídricas, 2 estudios resaltan la necesidad de incorporar prácticas sostenibles que garanticen un desarrollo económico paralelo al mantenimiento del caudal ecológico, para la preservación de organismos acuáticos (Bradford, 2008). No obstante, la normatividad emergente resalta metodologías convencionales y poco eficaces en ciertos países o ecosistemas, para lo cual, se sugiere la articulación de investigaciones científicas en la revisión o establecimiento de nuevas leyes, en búsqueda del fortalecimiento de la gestión y manejo de cuencas hidrográficas (da Costa et al., 2015).

2.1.2.2 Mecanismos sostenibles para la protección del caudal ecológico

A través de la *Tabla 9*, es posible evidenciar el porcentaje de influencia de cada mecanismo analizado sobre la conservación de biota acuática, resaltando, la investigación con un 47,8% de influencia, mientras que, el mecanismo menos investigado fue el monitoreo con un 7,6%.

Tabla 9. Mecanismos sostenibles para la protección del caudal ecológico

Cuerpo de agua	Número de artículos*	Porcentaje (%)
Investigación	56	47,8
Normatividad	15	12,8
Estructuras civiles	14	11,9
Información hidrológica	13	11,1
Indicadores ambientales	10	8,5
Monitoreo	9	7,6

**Se adopta un total de 117 artículos enfocados al estudio de cuerpos hídricos.*

Mecanismo	Descripción
<i>Investigación</i>	La evaluación de caudales ecológicos se considera escasa, por lo cual, se requiere de investigaciones que arrojen datos acerca de la salud del mismo en distintos cuerpos hídricos. En este sentido, 56 estudios detallan la interacción de componentes bióticos y abióticos ofreciendo múltiples panoramas del entorno, de forma que, se puedan aplicar modelos con bajas limitaciones para llegar a resultados verídicos, evitando al máximo porcentajes de error elevados (Steynor et al., 2009). Finalmente, es indispensable poner en práctica técnicas que abarquen el trabajo en campo y la digitalización para reducir dichos errores y generar escenarios de sostenibilidad, obteniendo alcances en la gestión y monitoreo del flujo ecológico (da Costa et al., 2015).
<i>Normatividad</i>	Las políticas que abarcan temáticas relacionadas con el recurso hídrico, en pocas oportunidades incorporan gobernanzas integrales, ya que, evitan tomar decisiones acerca de la biodiversidad en relación con los cuerpos de agua (Dallas & Rivers, 2014), en este sentido, 15 investigaciones, corroboran que el estudio ambiental del caudal ecológico se adopta desde una perspectiva científica, sin embargo, concuerdan en que las investigaciones realizadas son argumentos sólidos para unificar conceptos y generar leyes en torno a la conservación del flujo y así garantizar un mantenimiento de la biota acuática (Wu et al., 2020).

<i>Estructuras civiles</i>	Actualmente existe un conflicto con la infraestructura dispuesta sobre los cuerpos de agua para su eventual control y monitoreo, puesto que, en su mayoría, estas construcciones no cuentan con medidas de manejo ecológico, es decir, no generan descargas adecuadas para el mantenimiento de la comunidad acuática y vegetación cercana (Dallas & Rivers, 2014). Por consiguiente, 14 estudios proponen una modificación en los procedimientos operativos, por ejemplo, llevar a cabo la restauración de válvulas para la adecuada descarga del caudal ecológico (C. Katopodis & Aadland, 2006; Leite et al., 2016), de forma que, se evalúen los impactos ocasionados a raíz del funcionamiento de las estructuras.
<i>Información hidrológica</i>	Este recurso es uno de los más importantes dentro del análisis realizado, ya que, a partir de la información hidrológica se pueden desarrollar investigaciones, modelos, construcciones de protección y demás actividades o infraestructura necesaria para la conservación del caudal ecológico (Wu et al., 2020). No obstante, 13 estudios confirman la escasez de datos hidrológicos, ocasionando porcentajes de error al momento de interpretar la condición de las afectaciones en el agua, y su rol dentro de la gestión y planificación de proyectos ambientales (Vis et al., 2015).
<i>Indicadores ambientales</i>	Actualmente, el descubrimiento de indicadores ambientales dirigidos específicamente para evaluar el caudal ecológico se ha visto retrasado, ya que, se evidencia una complejidad al estudiar cada cuerpo de agua, y por ende, 10 estudios afirman que los indicadores de calidad varían y se determinan como aptos, aquellos que se ajusten a las características del mismo (Armanini et al., 2012; W. Li et al., 2015), sin embargo, se continúan empleando los parámetros físicos, químicos y biológicos, como base para comprender el comportamiento del agua y su función dentro de los ecosistemas.
<i>Monitoreo</i>	El monitoreo realizado sobre el caudal ecológico asegura que, los diferentes ecosistemas mantengan un nivel adecuado en cuanto a calidad y cantidad de agua, determinando aquellos momentos o temporadas críticas donde el flujo pueda verse amenazado por factores externos (Dallas & Rivers, 2014). No obstante, 9 investigaciones exponen la falta de implementación de monitoreos, por lo cual, se propone la creación de un sistema de monitoreo automático, a fin de evaluar con efectividad los comportamientos hidrológicos del afluente, en búsqueda la eficiencia para el tratamiento y mantenimiento del mismo (Chen & Wu, 2019).

4. Discusión

4.1. Alteración de variables físicas, químicas y biológicas en el caudal ecológico

En primer lugar, según (Yan et al., 2018), se toman los parámetros físicos como la temperatura, SST, salinidad, conductividad y turbidez, los cuales se relacionan para establecer un concepto de calidad en distintos cuerpos de agua, en este sentido, sobresale la temperatura como una de las variables que tiene influencia en el desarrollo biótico y abiótico del flujo ecológico. Sin embargo, (Araújo et al., 2013) corroboró que el cambio sobre algunas variables físicas, en especial la temperatura, no genera repercusiones a nivel biótico, ya que, las condiciones de vida permanecen estables en la mayoría de los organismos acuáticos estudiados (Araújo et al., 2013). Un ejemplo que pone en duda esta afirmación, se da en el río Qingshui de China donde especies como *C. idella*, *Xenocypris argentea*, *Hypophthalmichthys nobilis* y *H. molitrix* de aguas medias, desovan a una temperatura promedio de 18°C y 23°C, donde sus procesos de proliferación pueden afectarse debido al cambio térmico (J. Li et al., 2019; Popa et al., 2020). Igualmente, se relacionan las estaciones climáticas con el cambio de la temperatura en distintas zonas, según (V. C. Da Rosa & Garcia, 2015). En donde, evidenció un aumento del 56% y disminución del 60%, sobre la población de epífitas durante la estación invernal, generando así un rango de estabilidad térmico desde los -8°C hasta los 14°C (V. C. da Rosa & Garcia, 2015), aunque para objetar dicha investigación, (L. Wang et al., 2020), demostró que la variación de temperatura no influye directamente en el desarrollo de organismos en fuentes de agua, ya que, este cambio predomina como un factor esencial para el mantenimiento del ecosistema acuático (L. Wang et al., 2020)

Al relacionar los parámetros químicos como oxígeno disuelto, pH, nitritos, nitratos, fosfatos, DQO, DBO, iones y metales presentes en el flujo ecológico, se identifica una relación entre los mismos, con los impactos ambientales causados por actividades antropogénicas, las cuales representan un riesgo sobre el equilibrio de ecosistemas acuáticos (Upadhyay et al., 2011). Conforme a los parámetros mencionados, varios autores coinciden en que el oxígeno disuelto es el único factor que influye significativamente sobre las características químicas del agua. Un estudio que afirma lo anterior, se llevó a cabo en los estuarios El Miño y Lima en Portugal, donde el muestreo de OD en la entrada sobre el tramo del río abastecedor y cerca de la desembocadura al mar, registró valores de 9.5 mg O₂ / L y 7.5 mg O₂ / L respectivamente, confirmando dicha variación mediante el vínculo entre esta variable y la presencia de DBO, DQO y metales pesados en él (Oliveira et al., 2019). No obstante, (Walsh & Wepener, 2009), contradice esta información con otra variable como el pH, que involucra un análisis completo de elementos químicos que influyen negativamente sobre el flujo ecológico. Dicha teoría se sustenta, bajo una investigación en los ríos Crocodile y Magalies en Sudáfrica, donde los niveles de pH estaban directamente relacionados con las grandes concentraciones de nitrógeno inorgánico y DQO presentes en diferentes tramos de los cuerpos hídricos (Walsh & Wepener, 2009).

Por último, se toman las variables biológicas presentes en todos los cuerpos de agua, las cuales están influenciadas por factores tanto físicos como químicos, esto se refleja en los casos primeramente nombrados del río Qingshui de China y los estuarios El Miño y Lima en Portugal, donde se presentó una disminución sobre la tasa poblacional de organismos acuáticos, debido a la variación sobre la temperatura y oxígeno disuelto derivados de actividades humanas. Para contradecir lo anterior, (Guerra et al., 2016), en su investigación del Río San Juan de México, identificó temperaturas variables, descargas reducidas

y sólidos en suspensión a causa del comportamiento en 12 especies de peces, ratificando la influencia equitativa que existe entre parámetros físicos y químicos sobre la presencia/ausencia de especies acuáticas y la ejecución de sus funciones biológicas en distintos lechos del río (Guerra et al., 2016).

4.1.1 Otras alteraciones

Al mencionar otras alteraciones con gran influencia sobre las condiciones del caudal ecológico, se encuentran las presas y alteraciones climáticas, las cuales actúan de forma directa e indirecta sobre el flujo. En relación a esto, (Ma et al., 2018), identificó en su estudio dirigido a 62 proyectos de represas en China, un efecto perjudicial hacia cambios en la biodiversidad del río por la extinción de especies y la falta de regulación y monitoreo del caudal ecológico en las zonas vulnerables (Ma et al., 2019). Sin embargo, otros estudios como el de (Kuriqi et al., 2020), en donde se propone la construcción de presas a fin de aumentar la regulación en el flujo, ha sobresalido gracias a la correcta aplicación de procesos operativos sobre la gestión hídrica, evitando afectaciones en el desarrollo habitual de especies acuáticas (Kuriqi et al., 2020). En adición, las alteraciones climáticas generan cifras de temperatura y precipitación que indican un grado de severidad sobre el flujo y comunidades acuáticas (Xu et al., 2014). (Brown et al., 2018) en su estudio, registró un incremento poblacional de organismos bentónicos y algunos tipos de peces a medida que existía un aumento en el caudal del río, por otro lado, algunas especies arbóreas de la zona presentaron una mejora en la calidad de vida conforme a la acumulación de nutrientes en el suelo, debido a, la disminución del caudal en distintos tramos (Brown et al., 2018). Por lo anterior, es claro decir, que la variación climática en algunas zonas sobresale como un factor que no repercute de manera positiva o negativa sobre el desarrollo biótico de distintos ecosistemas acuáticos.

4.2 Cuerpos hídricos más alterados por la fluctuación del caudal ecológico

Actualmente, se evidencia como distintos cuerpos de agua son afectados debido al crecimiento de zonas industriales, es así como el caudal ecológico ha sido uno de los factores con mayor repercusión, ya que es el principal encargado del crecimiento de ecosistemas endémicos y la proliferación de especies acuáticas. Los ríos predominan como las zonas con mayor vulnerabilidad de acuerdo a (Lee et al., 2013), quién comprobó el cambio sobre la presencia de especies como *C. splendidus* y *P. nigra* en el río Geum en Korea, donde los cambios sobre la velocidad del caudal, profundidad del lecho y tamaño del sustrato, generaban alteraciones hidrodinámicas y morfodinámicas en la estabilidad del hábitat, durante largos períodos de tiempo (Lee et al., 2013). Aunque, (Pal et al., 2020) en su investigación del humedal perteneciente al lago Taihu de China, donde 36 especies desaparecieron a lo largo de 57 años debido a actividades humanas, corroboró que, a un periodo de tiempo más corto estos cuerpos de agua presentan cambios de gran magnitud en cuanto a su formación y estabilidad ecológica (Pal & Sarda, 2021), razón por la cual, se fundamenta el hecho de pérdida ecosistémica de forma singular en relación al tiempo de afectación. Sin embargo (Han et al., 2012), a través de su estudio afirmó que los organismos presentes en los arroyos, no se ven afectados por la variabilidad hídrica, por ende, no se manifiesta una pérdida de hábitat en relación al tiempo transcurrido durante distintas temporadas (Han et al., 2012).

4.3 Mecanismos sostenibles para la conservación del caudal ecológico y biota acuática

Por último, es evidente la aplicación de mecanismos sostenibles para la conservación del caudal ecológico y biota acuática en los artículos estudiados, cada uno asemeja la posibilidad de ejecutar herramientas de control y estimación del flujo con alta

efectividad, de acuerdo a las necesidades sociales y ambientales de los cuerpos hídricos. Sin embargo, (Mwedzi et al., 2016), expone que la escasez en cuanto a la gestión de mecanismos de conservación se limita a una aplicación individual, ya que es habitual la falta de integración entre estos para el manejo de caudales y evaluación de biota acuática (Mwedzi et al., 2016). Así mismo, influyen factores económicos que impiden efectuar dichas estrategias ambientales, como lo define (Perni et al., 2012), donde evaluó el interés por parte de la población de Sydney para restaurar los humedales del sector, a esto se le atribuye la disposición de inversión equivalente a 57, 37 € / año / persona. Lo anterior, predomina en cuanto a factores de disposición social y gubernamental ejercido en dichas zonas de alta vulnerabilidad (Leite et al., 2016).

5. Conclusiones

Los parámetros físicos y químicos representan la alteración del caudal ecológico, por medio umbrales de calidad de agua, donde dichos valores estiman la influencia de procesos naturales o antropogénicos sobre la variabilidad del flujo, sin embargo, los parámetros biológicos se determinan como los más exactos y confiables a la hora de predecir alteraciones sobre el flujo ecológico, puesto que, su análisis adopta factores físico-químicos, optimizando su caracterización y simulación en las respectivas investigaciones.

Todos los cuerpos de agua se encuentran en constante exposición debido al creciente desarrollo humano e industrial, no obstante, se observó una mayor alteración en los ríos y humedales, a razón de su aprovechamiento para suplir la demanda social y económica de las comunidades cercanas, logrando así, expresar una crisis a

nivel hidrológico y biológico por la pérdida de biodiversidad y escasez de flujo ecológico.

Existen diversos mecanismos sostenibles para la rehabilitación del caudal ecológico y la biota acuática, entre estos resaltan la investigación, normatividad, monitoreo, áreas protegidas y simulación ambiental. Todas las herramientas que surgen a partir de la implementación de dichos mecanismos han comprobado la efectividad en su aplicación, aun así, existe una carencia en la gestión y conectividad de estos para representar en su totalidad las condiciones y soluciones frente a la alteración del flujo ecológico y las comunidades acuáticas; de este modo, se plantea la necesidad de nuevos mecanismos de gestión con enfoques integrales para lograr la conservación y protección de los distintos cuerpos de agua.

Todos los parámetros y mecanismos expuestos en esta revisión se limitan a las características del cuerpo de agua, ya que, cada ubicación geoFigura presentará un comportamiento distinto del caudal ecológico, ocasionando una captura y adaptación de información para ejecutar métodos especializados según sea el caso de estudio.

Las propuestas presentadas en torno a la efectiva conservación y rehabilitación del caudal ecológico, requieren del respaldo por parte de los entes gubernamentales, las instituciones y la comunidad, con el fin de, optar por una administración que regule el uso actual del agua, y así cumplir el objetivo de evitar pérdidas hídricas y de biodiversidad en los ecosistemas acuáticos.

6. Referencias

- Acosta Castellanos, P. M., Ortegon, A. C., & Guerrero Sierra, H. F. (2020). Evaluation of simple space interpolation methods for the depth of precipitation: Application for Boyacá, Colombia. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems*, 5(6), 1322–1327. <https://doi.org/10.25046/AJ0506157>
- Alho, C. J. R. (2008). Biodiversity of the Pantanal: Response to seasonal flooding regime and to environmental degradation. *Brazilian Journal of Biology*, 68(4 SUPPL.), 957-966. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842008000500005>
- Aragón-Noriega, E. A., & Calderón Aguilera, L. E. (2000). Does damming of the Colorado River affect the nursery area of blue shrimp *Litopenaeus stylirostris* (Decapoda: Penaeidae) in the Upper Gulf of California? *Revista de Biología Tropical*, 48(4), 32-47. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442000000400011
- Araújo, F. G., Santos, A. B. I., & Albieri, R. J. (2013). Avaliando a similaridade das assembléias de peixes acima e abaixo de uma barragem de um reservatório Neotropical com obliteração parcial. *Brazilian Journal of Biology*, 73(4), 727-736. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842013000400007>
- Armanini, D. G., Monk, W. A., Tenenbaum, D. E., Peters, D. L., & Baird, D. J. (2012). Influence of runoff regime type on a macroinvertebrate-based flow index in rivers of British Columbia (Canada). *Ecohydrology*, 5(4), 414-423. <https://doi.org/10.1002/eco.234>
- Beaton, A. D., & Bradford, A. (2013). Demonstration of a methodology for setting ecological flow and water level targets. *Canadian Water Resources Journal*, 38(4), 296-310. <https://doi.org/10.1080/07011784.2013.830371>
- Boavida, I., Caetano, L., & Pinheiro, A. N. (2020). E-flows to reduce the hydropeaking impacts on the Iberian barbel

- (Luciobarbus bocagei) habitat. An effectiveness assessment based on the COSH Tool application. *Science of the Total Environment*, 699, 134209. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134209>
- Bradford, A. (2008). An Ecological Flow Assessment Framework: Building a Bridge to Implementation in Canada. *Canadian Water Resources Journal*, 33(3), 215-232. <https://doi.org/10.4296/cwrj3303215>
- Brown, C., Joubert, A., Tlou, T., Birkhead, A., Marneweck, G., Paxton, B., & Singh, A. (2018). The pongola floodplain, South Africa - part 2: Holistic environmental flows assessment. *Water SA*, 44(4), 746-759. <https://doi.org/10.4314/wsa.v44i4.22>
- Butakka, C. M. de M., Gomes, L. C., & Takeda, A. M. (2014). Estrutura taxonômica e numérica de Chironomidae (Diptera) em diferentes habitats de uma várzea neotropical. *Iheringia - Serie Zoologia*, 104(3), 314-322. <https://doi.org/10.1590/1678-476620141043314322>
- Carolli, M., Gelmini, F., Pellegrini, S., Deriu, M., & Zolezzi, G. (2021). Prioritizing reaches for restoration in a regulated Alpine river: Locally driven versus hydro-morphologically based actions. *River Research and Applications*, 37(1), 17-32. <https://doi.org/10.1002/rra.3737>
- Castro, D. M. P., Hughes, R. M., & Callisto, M. (2013). Influence of peak flow changes on the macroinvertebrate drift downstream of a Brazilian hydroelectric dam. *Brazilian Journal of Biology*, 73(4), 775-782. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842013000400013>
- Chen, A., & Wu, M. (2019). Managing for Sustainability: The Development of Environmental Flows Implementation in China. *Water*, 11(3), 433. <https://doi.org/10.3390/w11030433>

- Chen, A., Wu, M., Wu, S. nan, Sui, X., Wen, J. ya, Wang, P. yuan, Cheng, L., Lanza, G. R., Liu, C. na, & Jia, W. lin. (2019). Bridging gaps between environmental flows theory and practices in China. *Water Science and Engineering*, 12(4), 284-292. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2019.12.002>
- da Costa, M. R., Mattos, T. M., Fernandes, V. H., Martínez-Capel, F., Muñoz-Mas, R., & Araújo, F. G. (2015). Application of the physical habitat simulation for fish species to assess environmental flows in an Atlantic Forest Stream in South-eastern Brazil. *Neotropical Ichthyology*, 13(4), 685-698. <https://doi.org/10.1590/1982-0224-20140170>
- Da Rosa, V. C., & Garcia, M. (2015). Guildas ecológicas de diatomáceas (Bacillariophyta) epífitas em *Acrostichum danaeifolium* Langst. & Fisch em uma área úmida subtropical do sul do Brasil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 27(3), 311-321. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X4214>
- Da Silva, Y. J. A. B., Cantalice, J. R. B., Singh, V. P., Do Nascimento, C. W. A., Wilcox, B. P., & Bezerra Da Silva, Y. J. A. (2019). Heavy metal concentrations and ecological risk assessment of the suspended sediments of a multi-contaminated Brazilian watershed. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 41(1). <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v41i1.42620>
- Dallas, H., & Rivers, N. (2014, octubre 6). Ecological consequences of global climate change for freshwater ecosystems in South Africa. *South African Journal of Science*, 23-53. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0038-23532014000300010
- García De Jalón, D. (s. f.). *La Regulación de los caudales y su efecto en la biodiversidad*.
- García, T. D., Ota, R. R., Ferreira, D. G., Nascimento, R. H. C., Galindo, B. A., Pereira, L. S., & Zanatta, A. S. (2020). Distribution of siluriformes in a river under the influence of a small hydroelectric power plant of the Paraná river

- Basin, Brazil. *Iheringia - Serie Zoologia*, 110. <https://doi.org/10.1590/1678-4766e2020005>
- Gleeson, T., & Richter, B. (2018). How much groundwater can we pump and protect environmental flows through time? Presumptive standards for conjunctive management of aquifers and rivers. *River Research and Applications*, 34(1), 83-92. <https://doi.org/10.1002/rra.3185>
- Guerra, S., Lizárraga, L., & Návar, J. (2016). Riparian Communities along Longitudinal Gradients in Mexico's Northeastern San Juan River. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(4), 42-79. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222016000400055
- Haas, N. A., O'Connor, B. L., Hayse, J. W., Bevelhimer, M. S., & Endreny, T. A. (2014). Analysis of Daily Peaking and Run-of-River Operations with Flow Variability Metrics, Considering Subdaily to Seasonal Time Scales. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(6), 1622-1640. <https://doi.org/10.1111/jawr.12228>
- Han, J.-C., Huang, G.-H., Zhang, H., Zhuge, Y.-S., & He, L. (2012). Fuzzy constrained optimization of eco-friendly reservoir operation using self-adaptive genetic algorithm: a case study of a cascade reservoir system in the Yalong River, China. *Ecohydrology*, 5(6), 768-778. <https://doi.org/10.1002/eco.267>
- Katopodis, C., & Aadland, L. P. (2006). Effective dam removal and river channel restoration approaches. *International Journal of River Basin Management*, 4(3), 153-168. <https://doi.org/10.1080/15715124.2006.9635285>
- Katopodis, Christos. (2005). Developing a toolkit for fish passage, ecological flow management and fish habitat works. *Journal of Hydraulic Research*, 43(5), 451-467. <https://doi.org/10.1080/00221680509500144>

- Knight, R. R., Murphy, J. C., Wolfe, W. J., Saylor, C. F., & Wales, A. K. (2014). Ecological limit functions relating fish community response to hydrologic departures of the ecological flow regime in the Tennessee River basin, United States. *Ecohydrology*, 7(5), 1262-1280. <https://doi.org/10.1002/eco.1460>
- Kuriqi, A., Pinheiro, A. N., Sordo-Ward, A., & Garrote, L. (2020). Water-energy-ecosystem nexus: Balancing competing interests at a run-of-river hydropower plant coupling a hydrologic–ecohydraulic approach. *Energy Conversion and Management*, 223, 113267. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113267>
- Larsen, S., Bruno, M. C., & Zolezzi, G. (2019). WFD ecological status indicator shows poor correlation with flow parameters in a large Alpine catchment. *Ecological Indicators*, 98, 704-711. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.11.047>
- Lee, S., Kim, J., & Hur, J. W. (2013). Assessment of ecological flow rate by flow duration and environmental management class in the Geum River, Korea. *Environmental Earth Sciences*, 68(4), 1107-1118. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1812-y>
- Leite, M. G. P., Pimenta, E. C., Fujaco, M. A. G., & Eskinazi-Sant'Anna, E. M. (2016). Canais de irrigação na bacia do ribeirão do Melo (Municípios de Rio Espera e Capela Nova, Minas Gerais, Brasil): Habitats para a proliferação de *Biomphalaria* (Gastropoda: Planorbidae) e potencial disseminação da esquistossomose. *Brazilian Journal of Biology*, 76(3), 638-644. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.22714>
- Li, J., Qin, H., Pei, S., Yao, L., Wen, W., Yi, L., Zhou, J., & Tang, L. (2019). Analysis of an Ecological Flow Regime during the *Ctenopharyngodon Idella* Spawning Period Based on Reservoir Operations. *Water*, 11(10), 2034. <https://doi.org/10.3390/w11102034>

- Li, W., Chen, Q., Cai, D., & Li, R. (2015). Determination of an appropriate ecological hydrograph for a rare fish species using an improved fish habitat suitability model introducing landscape ecology index. *Ecological Modelling*, 311, 31-38. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.05.009>
- Liu, C., Zhao, C., Xia, J., Sun, C., Wang, R., & Liu, T. (2011). An instream ecological flow method for data-scarce regulated rivers. *Journal of Hydrology*, 398(1-2), 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.11.026>
- Ma, L., Wang, H., Qi, C., Zhang, X., & Zhang, H. (2019). Characteristics and Adaptability Assessment of Commonly Used Ecological Flow Methods in Water Storage and Hydropower Projects, the Case of Chinese River Basins. *Water*, 11(10), 2035. <https://doi.org/10.3390/w11102035>
- Ma, L., Zhang, X., Wang, H., & Qi, C. (2018). Characteristics and Practices of Ecological Flow in Rivers with Flow Reductions Due to Water Storage and Hydropower Projects in China. *Water*, 10(8), 1091. <https://doi.org/10.3390/w10081091>
- Magalhães Junior, A. P., & Curiel, P. B. (2017). Instrumentos de concesión administrativa de derechos de uso del agua en España. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, 22. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.0217170011>
- Mantel, S., Hughes, D., & Muller, N. (2010). Ecological impacts of small dams on South African rivers Part 1: drivers of change - water quantity and quality. *Water SA*, 36(3), 78-96. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1816-79502010000300016
- Martínez, A., Manzanilla, S., & Zavalá, J. (2011). Vulnerability to climate change of marine and coastal fisheries in México. *Atmósfera*, 24(1), 103-123. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0187-62362011000100008&lng=es&nrm=iso&tlng=en

- McKenna, J. E. (2019). The Laurentian Great Lakes: A case study in ecological disturbance and climate change. *Fisheries Management and Ecology*, 26(6), 486-499. <https://doi.org/10.1111/fme.12317>
- Mwedzi, T., Katiyo, L., Mugabe, F. T., Bere, T., Bangira, C., Mangadze, T., & Kupika, O. L. (2016). A spatial assessment of stream-flow characteristics and hydrologic alterations, post dam construction in the Manyame catchment, Zimbabwe. *Water SA*, 42(2), 194-202. <https://doi.org/10.4314/wsa.v42i2.03>
- Nyamangara, J., Jeke, N., & Rurinda, J. (2013). Long-term nitrate and phosphate loading of river water in the Upper Manyame Catchment, Zimbabwe. *Water SA*, 39(5), 637-642. <https://doi.org/10.4314/wsa.v39i5.7>
- Oliveira, V. H., Sousa, M. C., Morgado, F., & Dias, J. M. (2019). Modeling the Impact of Extreme River Discharge on the Nutrient Dynamics and Dissolved Oxygen in Two Adjacent Estuaries (Portugal). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(11), 412. <https://doi.org/10.3390/jmse7110412>
- Pal, S., & Sarda, R. (2021). Measuring the degree of hydrological variability of riparian wetland using hydrological attributes integration (HAI) histogram comparison approach (HCA) and range of variability approach (RVA). *Ecological Indicators*, 120, 106966. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106966>
- Pal, S., Talukdar, S., & Ghosh, R. (2020). Damming effect on habitat quality of riparian corridor. *Ecological Indicators*, 114, 106300. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106300>
- Pantoja, N. (2017). *Estimación de caudal ecológico mediante método hidrológicos, hidráulicos y ecológicos en la quebrada El Conejo (Mocoa-Putumayo)* [Pontificia Universidad Javeriana]. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/21157>

- Park, S. Y., Sur, C., Lee, J. H., & Kim, J. S. (2020). Ecological drought monitoring through fish habitat-based flow assessment in the Gam river basin of Korea. *Ecological Indicators*, *109*, 105830. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105830>
- Patterson, L., Phelan, J., Goudreau, C., & Dykes, R. (2017). Flow-Biology Relationships Based on Fish Habitat Guilds in North Carolina. *Journal of the American Water Resources Association*, *53*(1), 56-66. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12495>
- Pedone-Bonfim, M. V. L., Alves da Silva, D., Maia, L. C., & Yano-Melo, A. M. (2018). Mycorrhizal benefits on native plants of the Caatinga, a Brazilian dry tropical forest. *Symbiosis*, *74*, 79-88. <https://doi.org/10.1007/s13199-017-0510-7>
- Perni, Á., Martínez-Paz, J., & Martínez-Carrasco, F. (2012). Social preferences and economic valuation for water quality and river restoration: The Segura River, Spain. *Water and Environment Journal*, *26*(2), 274-284. <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2011.00286.x>
- Popa, F., Dumitran, G. E., Vuta, L. I., Tica, E. I., Popa, B., & Neagoe, A. (2020). Impact of the ecological flow of some small hydropower plants on their energy production in Romania. *Journal of Physics: Conference Series*, *1426*(1), 12043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1426/1/012043>
- Principe, R. E., Márquez, J. A., & Cibils-Martina, L. (2019). Distribution and habitat preference of ephemeroptera and trichoptera in subtropical mountain streams: Implications for monitoring and conservation. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, *91*(3). <https://doi.org/10.1590/0001-3765201920180692>
- Qin, L., Li, K., Li, Y., Liang, R., Chen, M., & Hodges, B. R. (2016). A habitat similarity model based on vague sets to assess *Schizothorax prenanti* spawning habitat. *Ecological Engineering*, *96*, 86-93. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.04.007>

- Richter, B. W., & De Sousa, L. O. (2019). The implementation of enviroRichter, B. W., & De Sousa, L. O. (2019). The implementation of environmental education to promote sustainability: an overview of the processes and challenges. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 26(8), 721-731. <https://doi.org/10.1080/13504509.2019.1672220>
- Rivers, N., Hughes, D., Mantel, S., & Hill, T. (2008). First steps in the development of a water temperature model framework for refining the ecological Reserve in South African rivers. *Water SA*, 34(5), 23-47. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1816-79502008000500008
- Roets, W., Raitt, L., & Brendonck, L. (2008). Groundwater discharges to aquatic ecosystems associated with the Table Mountain Group (TMG) aquifer: A conceptual model. *Water SA*, 34(1), 12-45. http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1816-79502008000100010
- Rosa, B. F. J. V., Martins, R. T., & Alves, R. G. (2015). Distribuição de oligoquetas em um riacho da mata atlântica, sudeste do Brasil. *Brazilian Journal of Biology*, 75(1), 1-7. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.02313>
- Rosin, G. C., Oliveira-Mangarotti, D. P., Takeda, A. M., & Butakka, C. M. M. (2009). Consequences of dam construction upstream of the Upper Paraná River floodplain (Brazil): A temporal analysis of the Chironomidae community over an eight-year period. *Brazilian Journal of Biology*, 69(SUPPL. 2), 591-608. <https://doi.org/10.1590/s1519-69842009000300014>
- Simões, N. R., Lansac-Tôha, F. A., Velho, L. F. M., & Bonecker, C. C. (2012). Intra and inter-annual structure of zooplankton communities in floodplain lakes: A long-term ecological research study. *Revista de Biologia Tropical*, 60(4), 1819-1836. <https://doi.org/10.15517/rbt.v60i4.2183>

- Sousa, R. G. C., & Freitas, C. E. D. C. (2008). The influence of flood pulse on fish communities of floodplain canals in the Middle Solimões River, Brazil. *Neotropical Ichthyology*, 6(2), 249-255. <https://doi.org/10.1590/s1679-62252008000200013>
- Souza-Cruz-Buenaga, F. V. A., Espig, S. A., Castro, T. L. C., & Santos, M. A. (2019). Environmental impacts of a reduced flow stretch on hydropower plants. *Brazilian Journal of Biology*, 79(3), 470-487. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.183883>
- Steynor, A. C., Hewitson, B. C., & Tadross, M. A. (2009). Projected future runoff of the Breede river under climate change. *Water SA*, 35(4), 433-440. <https://doi.org/10.4314/wsa.v35i4.76803>
- Talukdar, S., Pal, S., Chakraborty, A., & Mahato, S. (2020). Damming effects on trophic and habitat state of riparian wetlands and their spatial relationship. *Ecological Indicators*, 118, 106757. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106757>
- Tan, G., Yi, R., Chang, J., Shu, C., Yin, Z., Han, S., Feng, Z., & Lyu, Y. (2018). A new method for calculating ecological flow: Distribution flow method. *AIP Advances*, 8(4), 045118. <https://doi.org/10.1063/1.5022048>
- Tan, Y. yi, Wang, X., Li, C. hui, Cai, Y. peng, Yang, Z. feng, & Wang, Y. li. (2012). Estimation of ecological flow requirement in Zoige Alpine Wetland of southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 66(5), 1525-1533. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1392-2>
- Theodoropoulos, C., Papadaki, C., Vardakas, L., Dimitriou, E., Kalogianni, E., & Skoulikidis, N. (2019). Conceptualization and pilot application of a model-based environmental flow assessment adapted for intermittent rivers. *Aquatic Sciences*, 81(1), 10. <https://doi.org/10.1007/s00027-018-0605-0>
- Thürer, M., Tomašević, I., Stevenson, M., Qu, T., & Huisingsh, D. (2018). A systematic review of the literature on integrating

- sustainability into engineering curricula. *Journal of Cleaner Production*, 181, 608-617. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.130>
- Tibúrcio, G. S., Da Silva Carvalho, C., Ferreira, F. C., Goitein, R., & Ribeiro, M. C. (2016). Efeito da paisagem na ocorrência da ictiofauna em rios de primeira ordem da região sudeste do Brasil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 28. <https://doi.org/10.1590/S2179-975X2515>
- Tsheboeng, G. (2020). Environmental factors that influence species diversity of floodplain plant communities in different flooding phases in the Okavango Delta, Botswana. *African Biodiversity & Conservation*, 50(1), 120-139. https://www.researchgate.net/publication/342184525_Environmental_factors_that_influence_species_diversity_of_floodplain_plant_communities_in_different_flooding_phases_in_the_Okavango_Delta_Botswana
- Upadhyay, R., Dasgupta, N., Hasan, A., & Upadhyay, S. K. (2011). Managing water quality of River Yamuna in NCR Delhi. *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(9-11), 372-378. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.018>
- Vis, M., Knight, R., Pool, S., Wolfe, W., & Seibert, J. (2015). Model Calibration Criteria for Estimating Ecological Flow Characteristics. *Water*, 7(12), 2358-2381. <https://doi.org/10.3390/w7052358>
- Vorwerk, P. D., Froneman, P. W., Paterson, A. W., Strydom, N. A., & Whitfield, A. K. (2008). Biological responses to a resumption in river flow in a freshwater-deprived, permanently open Southern African estuary. *Water SA*, 34(5), 597-604. <https://doi.org/10.4314/wsa.v34i5.180657>
- Walsh, G., & Wepener, V. (2009). The influence of land use on water quality and diatom community structures in urban and agriculturally stressed rivers. *Water SA*, 35(5), 579-594. <https://doi.org/10.4314/wsa.v35i5.49184>

- Wang, L., Chen, Q., Zhang, J., Xia, J., Mo, K., & Wang, J. (2020). Incorporating fish habitat requirements of the complete life cycle into ecological flow regime estimation of rivers. *Ecohydrology*, 13(4), e2204. <https://doi.org/10.1002/eco.2204>
- Wang, X., Hao, G., Yang, Z., Liang, P., Cai, Y., Li, C., Sun, L., & Zhu, J. (2015). Variation analysis of streamflow and ecological flow for the twin rivers of the Miyun Reservoir Basin in northern China from 1963 to 2011. *Science of the Total Environment*, 536, 739-749. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.088>
- Wang, Y., Zhang, N., Wang, D., Wu, J., & Zhang, X. (2018). Investigating the impacts of cascade hydropower development on the natural flow regime in the Yangtze River, China. *Science of the Total Environment*, 624, 1187-1194. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.212>
- Weerts, S. P., & Cyrus, D. P. (2008). Inter-basin water transfer effects on the invertebrates of the Mvuzane River: A test of the SASS rapid biomonitoring protocol to assess the impact of flow modification. *Water SA*, 34(2), 175-182. <https://doi.org/10.4314/wsa.v34i2.183637>
- Westwood, C. G., England, J., Dunbar, M. J., Holmes, N. T. H., Leeming, D. J., & Hammond, D. (2017). An approach to setting ecological flow thresholds for southern English chalk streams. *Water and Environment Journal*, 31(4), 528-536. <https://doi.org/10.1111/wej.12275>
- Wu, M., Chen, A., Zhang, X., & McClain, M. E. (2020). A Comment on Chinese Policies to Avoid Negative Impacts on River Ecosystems by Hydropower Projects. *Water*, 12(3), 869. <https://doi.org/10.3390/w12030869>
- Xu, G., Sun, H. L., & Li, S. C. (2014). Research on the ecological scheduling decisions of the Jinping cascade hydropower station on the Yalong river. *Energy Sources, Part A: Recovery*,

Utilization and Environmental Effects, 36(10), 1115-1122.
<https://doi.org/10.1080/15567036.2010.544010>

Yan, Z., Zhou, Z., Sang, X., & Wang, H. (2018). Water replenishment for ecological flow with an improved water resources allocation model. *Science of the Total Environment*, 643, 1152-1165. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.085>

Zhang, P., Li, K. F., Wu, Y. L., Liu, Q. Y., Zhao, P. X., & Li, Y. (2018). Analysis and restoration of an ecological flow regime during the *Coreius guichenoti* spawning period. *Ecological Engineering*, 123, 74-85. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.009>

Capítulo 2

Valoración de la asociación simbiótica entre *Helianthus annuus* var. *giganteus* y hongos micorrízicos arbusculares en suelos contaminados con plomo²

Assessment of the symbiotic association between Helianthus annuus var. *giganteus* and arbuscular mycorrhizal fungi in lead-contaminated soils

² Autores: Andrés Felipe Rivera, Kellys Nallith Salcedo Hurtado, Carolina García Avila. Tecnológico de Antioquia. Medellín. Colombia

RESUMEN

La contaminación por plomo en suelo, agua y aire ha sido una problemática estudiada por científicos, sin embargo, actualmente se evidencia que este metal se sigue utilizando de manera no regulada en muchos países para fabricar toda clase de productos sin establecer límites de concentración de este, lo que ocasiona una alta exposición y en los ecosistemas puede irse acumulando en la cadena trófica. Una de las plantas utilizadas en la extracción del plomo es el *Helianthus annuus*; tiene un alto potencial fitorremediador y en asocio con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) genera un efecto fitorremediador. En el proceso de asociación se valoraron parámetros como el pH y la conductividad, se cuantificó la cantidad de hojas, longitud de los tallos, diámetro de las plantas, se midió la concentración de esporas de los hongos micorrízicos arbusculares, la colonización micorrízica arbuscular en el *Helianthus annuus* y se realizó mediante la adición de yoduro de potasio pruebas cualitativas de presencia del plomo en el suelo y tejido vegetal. Los resultados evidenciaron que el *Helianthus annuus var. giganteus* es adaptable a concentraciones de plomo, y que la asociación con los HMA favorece luego de 20 días el desarrollo de las estructuras de la planta.

Palabras claves: HMA, EPTs, Plomo, metales pesados

ABSTRACT

Lead contamination in soil, water and air has been a problem studied by scientists, however, it is currently evident that this metal is still used in an unregulated manner in many countries to manufacture all kinds of products without establishing concentration limits. , which causes a high exposure and in ecosystems it can accumulate in the trophic chain. One of the plants used in the extraction of lead is *Helianthus annuus*; it has a high phytoremediation potential and in association with arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) generates a phytoremediation

effect. In the association process, parameters such as pH and conductivity were assessed, the number of leaves, length of the stems, diameter of the plants were quantified, the concentration of spores of arbuscular mycorrhizal fungi, arbuscular mycorrhizal colonization in the *Helianthus annuus* and qualitative tests for the presence of lead in soil and plant tissue were performed by adding potassium iodide. The results showed that *Helianthus annuus var. giganteus* is adaptable to lead concentrations, and the association with AMF favors the development of plant structures after 20 days.

Keywords: HMA, EPTs, Lead, Heavy metals.

1. Introducción

El aumento de la actividad industrial, la explotación minera, las emisiones atmosféricas, el incremento del uso de productos agrícolas como abonos, fertilizantes y pesticidas, la urbanización acelerada y la inadecuada disposición de residuos ha provocado el incremento de las concentraciones de contaminantes en el suelo, el aire y el agua (Chinmayee et al., 2012).

¿Afectan de forma significativa las actividades antrópicas a la calidad de los recursos naturales?

La contaminación en suelos por Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT_s), ocurre cuando estos son irrigados con aguas residuales industriales, domésticas, aguas superficiales y/o lluvias con concentraciones de metales pesados y otros compuestos, las cuales son utilizadas para riego de cultivos o vertidas directamente en el suelo o en un cuerpo de agua sin ningún tipo de tratamiento, lo que trae como consecuencia la acumulación de diversos contaminantes orgánicos e inorgánicos con diferentes grados de complejidad por el nivel de toxicidad y se pueden acumular en el suelo, la vegetación, animales y pasar posteriormente a la cadena trófica (Krueger et al., 2013; Moreno, 2011; OMS, 2019).

Los EPTs son ampliamente utilizados en: procesos agrícolas, la actividad minera, la galvanoplastia, las fundiciones y el

refinamiento de oro, las reacciones nucleares y la industria de gran diversidad de productos como: elementos eléctricos, aleaciones metálicas, baterías, pinturas, pesticidas, y fertilizantes sintéticos, entre otros (Chinmayee et al., 2012), combustibles y explosivos (Gupta et al., 2013; Kachenko et al., 2007). Se caracterizan por su alta permanencia en los ecosistemas a lo largo de miles de años, incluso cuando su incorporación se ha interrumpido en el medio ambiente. Los EPTs se pueden encontrar en suelos haciendo parte de los minerales, por ejemplo: el magnesio (Mg), el potasio (K), el sodio (Na), el calcio (Ca), el hierro (Fe), el aluminio (Al) y silicio (Si); como óxidos, hidróxidos, carbonatos, sales solubles metálicas, cationes y aniones disponibles y compuestos parcialmente o solubles insolubles (Pineda, 2004). Los EPTs son fundamentales en la nutrición vegetal al promover la actividad enzimática del metabolismo vegetal, como es el caso del Mn (Mahler, 2004), otros como el plomo, el cobre, el zinc, el mercurio, el cromo y el cadmio son vitales para las células en bajas concentraciones, más cuando se presentan en concentraciones elevadas pueden originar toxicidad para los seres vivos en general, por ejemplo: plantas, animales y organismos del suelo (Mahler, 2004).

Los EPTs se clasifican según su origen en geogénicos (originados en la roca madre que dan lugar a la formación del suelo) o antropogénicos (proviene de residuos peligrosos originados en actividades agrícolas, industriales, mineras y residuos sólidos de origen urbano, entre otros); y acorde a su actividad biológica se catalogan como oligoelementos o micronutrientes, los cuales son necesarios en pequeñas concentraciones para que los seres vivos completen su ciclo de vida, y sin actividad biológica conocida, es decir se acumulan en los organismos donde pueden generar toxicidad (cadmio, mercurio, plomo, cobre, antimonio o el bismuto) (Alcalá et al., 2009).

Uno de los EPTs más estudiado es el plomo (Pb), el cual es un metal pesado considerablemente utilizado en diversos procesos por su maleabilidad, ductibilidad, resistencia a la corrosión

y versatilidad para formar aleaciones. Puede permanecer en el suelo de 740 a 5.900 años, con un agravante, que su concentración y movilidad está influenciada por el tipo de suelo, las propiedades fisicoquímicas y las asociaciones microbianas que pueden presentarse en el suelo rizosférico y en el sistema radicular de las plantas (Saa & Victoria, 2011). Es clasificado como el segundo elemento más peligroso en la lista de prioridades de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (Schneider et al., 2016) debido a que es un elemento tóxico, el cual se acumula en los tejidos afectando órganos como los riñones, el hígado, el cerebro, los huesos y los dientes (Sanín et al., 1998). Además, de su no biodegradabilidad, tiene como propiedades: la movilidad y acumulación hasta alcanzar niveles tóxicos en el suelo, y la biodisponibilidad a otros elementos de los ecosistemas (Saa & Victoria, 2011).

En los seres humanos el Pb puede ser inhalado y absorbido por la generación de partículas a partir de la combustión de ciertos materiales, (Zurera et al., 1987), ingestión de polvo, o por absorción de la piel (Reyes et al., 2016) o alimentos contaminados, mientras que, en las plantas o componente vegetal la incorporación del Pb al tejido se realiza por las raíces. A las aguas y al suelo, el Pb puede llegar a través del proceso de precipitación, infiltración y lixiviación.

La contaminación por Pb y su efecto tóxico en las personas, ecosistemas acuáticos y en el suelo ha sido una problemática altamente estudiada; sin embargo, a pesar de los esfuerzos de científicos, hoy en día muchos países utilizan el plomo de manera no regulada para fabricar toda clase de productos, exponiendo a los consumidores a niveles peligrosos que pueden alterar el crecimiento de los niños y el funcionamiento del cerebro en adultos o incluso desencadenar en la muerte en casos más extremos. Con estos peligros inminentes, y teniendo presente que en Colombia no se tiene una normatividad que regule el uso del plomo en la elaboración, comercialización o importación de

artículos como: juguetes, accesorios, tuberías, ropa, pinturas o productos alimenticios, El Senado de la República ha propuesto el proyecto de Ley 148 de 2015 para determinar límites en la utilización del plomo.

La Agencia de Protección del Ambiente (EPA, 2016) estableció como límite máximo permitido en suelos una concentración de Pb entre 300 a 500 mg de Pb/kg de suelo, para que se active las medidas de remediación. Desde una perspectiva biológica, se han propuesto soluciones factibles a la contaminación de los suelos contaminados con plomo como son la fitodegradación, fitovolatilización, fitoextracción, fitoestabilización y fitoestimulación. Estos métodos de restauración ambiental se han venido posicionando dado sus bajos costos, su amplia aceptación y aplicación para la remediación de los pesticidas y de los metales. Desde 1993 se han divulgado 483 revisiones y 4576 artículos de este tópico (Weis & Weis, 2004). La fitorremediación como un conjunto de técnicas busca disminuir, transformar o fijar elementos contaminantes del ambiente (agua, suelo o aire) provenientes de las acciones antropogénicas y/o naturales.

El *Helianthus annuus* conocido como girasol ha sido reconocido como una planta con potencial para hiperacumular metales pesados, por su capacidad para absorber y almacenar en su biomasa grandes cantidades de estos metales, más cuando se combina con los Hongos Micorrízico Arbusculares (HMA), los cuales aceleran los procesos de extracción y posibilita la recuperación de los suelos ayudando a la absorción de elementos en las plantas, amplificando su área radical y fomentando la tolerancia y el crecimiento de la planta en suelos contaminados. El éxito de esta asociación depende de factores físicos y químicos como el porcentaje de humedad, la temperatura, las características del suelo, el pH, la permeabilidad y el nivel de toxicidad (García Ávila et al., 2018). Las asociaciones micorrízicas pueden encaminar a un fortalecimiento de hasta el 80% en la absorción de Pb por parte de las plantas (Schneider et al., 2016),

ya que mejoran la absorción, transferencia, y translocación, de EPTs, como el Pb presente en suelos contaminados. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de adaptación del *Helianthus annuus* micorrizado en suelos contaminados con plomo.

2. Metodología

2.1. Localización geoFigura.

El experimento se realizó bajo condiciones de invernadero, en la ciudad de Medellín, en la sede principal del Tecnológico de Antioquia, IU, cuyas coordenadas son 6° 16'46''N y 75° 35' 01''O, a una altitud de 1495 m.s.n.m., una temperatura media de 21,5°C y una humedad entre 63%-73% (IDEAM, 2018).

2.2. Preparación de concentraciones de plomo.

Como fuente de una solución estándar para contaminar el suelo, se utilizó acetato de plomo, $Pb(CH_3COO)_2 \cdot 3H_2O$ (Protokimica®), con una pureza del 96 al 99%. El compuesto plomado se seleccionó debido a que este es comúnmente utilizado en colorantes de textiles, en la elaboración de impermeables, barnices, pigmentos, pinturas, insecticidas y como cosmético en tintes del cabello (García Ávila et al., 2018). El acetato de plomo fue macerado y disuelto en agua destilada para preparar la solución estándar, con la cual se obtuvo tres concentraciones de plomo: 300, 500 y 700 mg de Pb/Kg.

2.3. Preparación del suelo contaminado.

Se utilizó un suelo con clase textural franco arcillo arenoso (Tierranegra®), cuya determinación se realizó por el procedimiento

de Bouyoucos (método AS-09 NOM-021-RECNAT-2000), con una densidad relativa de 1,04 g/mL (método AS-03 NOM-021-RECNAT-2000) (SEMARNAT, 2002) y libre de microorganismos, especialmente patógenos, para evitar que estos alteraran los resultados. En la Tabla 1 indica las características fisicoquímicas del suelo estudiado.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del suelo previas a la contaminación con plomo.

Propiedades Fisicoquímicas	Valores	Unidades
Tierra negra	65 %	%
Cascarilla de arroz	26 %	%
Materia orgánica de origen animal	6,5 %	%
Calcio, magnesio	2 %	%
Nitrógeno, fósforo, potasio balanceado	0,3 %	%
Elementos menores: azufre, boro, cobre, molibdeno, zinc	0,2 %	%
pH	7.0	-
<i>Distribución de tamaño de partícula</i>		
Arena	65	%
Limo	0	%
Arcilla	35	%
Clase textural	Franco arcillo arenoso	

Se tomaron 48 Kg de suelo, los cuales se dividieron en cuatro porciones de 12 Kg para aplicar de forma independiente las tres concentraciones de plomo previamente preparadas (300, 500 y 700 mg de Pb/Kg). Se utilizaron 250 mL de cada concentración de acetato de plomo para contaminar de forma independiente dos kilogramos de suelo (unidad experimental). A los tratamientos sin contaminación de plomo se les aplicó 250 mL de agua destilada.

En suspensiones de suelo y agua (V:V - 1:1) se midió el pH y la conductividad eléctrica del suelo utilizando el equipo Thermo Scientific Orion 5 Star para aplicar su respectiva corrección a un pH de 6,0 – 6,5 (Osorio, 2020). Posteriormente, se confirmó en el suelo la presencia de plomo utilizando yoduro de potasio, el cual forma un precipitado de color amarillo intenso en presencia de plomo (Eckstein et al., 1992).

2.4. Diseño experimental.

Se estableció un diseño experimental completamente al azar, bajo un arreglo factorial 4x2, con tres repeticiones. Considerando cuatro niveles de concentración de plomo como factor A y dos niveles de hongos formadores de micorriza arbusculares como factor B (Tabla 2). Las concentraciones de plomo se definieron de acuerdo a lo planteado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA), la cual establece un rango máximo entre 300 a 500 mg Pb/Kg de suelo (EPA, 2016).

Tabla 2 Diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 4x2.

Tratamientos	Factor A	Factor B
T1	0 mg Pb/Kg	Con inoculación de hongos micorrízicos arbusculares
T2	300 mg Pb/Kg	
T3	500 mg Pb/Kg	
T4	700 mg Pb/Kg	
T5	0 mg Pb/Kg	Sin inoculación de hongos micorrízicos arbusculares
T6	300 mg Pb/Kg	
T7	500 mg Pb/Kg	
T8	700 mg Pb/Kg	
Repeticiones	3 / tratamiento	
Unidades Experimentales	24	

2.5. Establecimiento del experimento

Se depositaron 2 Kg de la mezcla de suelo contaminado en bolsas de polietileno (12,5 cm de diámetro por 20 cm de altura), las cuales se ubicaron en cajas de cartón forradas con bolsas plásticas para evitar derrames (49 cm de largo, 25 cm de altura y 16,5 cm de ancho).

La inoculación del suelo con hongos micorrízicos arbusculares se realizó homogenizando 100 g de inóculo crudo (SOBIOTECH S.A.S[®]) en la parte superficial del suelo, proceso realizado bajo condiciones de asepsia. Previamente, se evaluó la calidad del inóculo a través del método de tamizado, centrifugación en solución de sacarosa y observación al estereoscopio utilizando un aumento de 100X (Zeiss modelo STEMI305) (Osorio, 2020). Asimismo, a los tratamientos T1 y T5, sin inoculación de hongos micorrízicos arbusculares, se les adicionó 100 g de arena esterilizada.

Las semillas de *Helianthus annuus var. giganteus* (FERCON[®]) se germinaron previamente con la finalidad de sincronizar el crecimiento vegetal. Por tanto, se realizó una desinfección superficial de 240 semillas con etanol al 70%, estas fueron transferidas a una cámara húmeda durante tres días, se seleccionaron 72 semillas germinadas con presencia de radícula y se sembraron tres semillas en cada unidad experimental.

Cada tratamiento se repitió tres veces y cada unidad experimental se ubicó al azar en el invernadero. El contenido de humedad de cada unidad experimental se mantuvo al 60 % de la capacidad de retención de agua pesando las macetas dos veces por semana (ICONTEC, 2018). Se agregó agua de grifo según fue necesario. El manejo de las plantas se realizó bajo condiciones de estrés nutricional, dado que en condiciones de campo se tendría baja disponibilidad de nutrientes. Por consiguiente, no se realizó fertilización.

En relación al manejo y control preventivo de plagas se utilizaron trampas adhesivas combinadas con trampas cromáticas para insectos. Adicionalmente, se realizó aplicación de un insecticida orgánico a base de ají y ajo (Alisin®) y un producto biológico para el control de larvas del Orden Lepidóptera (Dipel®).

2.6. Variables monitoreadas en el experimento.

El crecimiento de las plantas se evaluó durante ocho semanas, para lo cual se realizaron mediciones dos veces a la semana de: cantidad de hojas, longitud (cm) y diámetro del tallo (cm). Adicionalmente, utilizando el equipo Thermo Scientific Orion 5 Star y empleando una relación 1:1 (V:V) se midió pH y conductividad eléctrica con la finalidad de valorar la adaptabilidad de la planta al suelo contaminado (Osorio, 2020).

Las plantas fueron cosechadas ocho semanas después de la siembra, dado que en este periodo (etapa vegetativa) se obtuvo suficiente biomasa aérea y radicular. Después de la cosecha, se lavó la biomasa con agua destilada tres veces para quitar resto de suelo y se secaron con papel, seguido se tomó el peso en fresco (g), se secó en estufa (Binder) a 40 °C durante 24 horas y se determinó el peso seco (g). De cada unidad experimental en la cosecha se tomaron muestras de raíz para determinar el porcentaje de colonización de los hongos micorrízicos arbusculares (HMA). Para tal fin, se utilizó el método de tinta china al 5% en una solución de vinagre (ácido acético), técnica propuesta por (Vierheilig et al., 1998). No obstante, el método fue modificado y se desarrolló realizando decoloración con una solución de KOH al 10% durante 24 horas, luego por un lapso de 30 minutos se agregó una solución de tinta china Parker al 0.05% en ácido acético al 3%. Finalmente, las raíces se transfirieron a una caja Petri con glicerina para realizar observación al estereoscopio utilizando un aumento de 100X (Zeiss modelo STEMI305). La determinación del porcentaje de infección micorrizal se realizó según la técnica del intercepto de la cuadrícula, la cual

se basa en la relación de la presencia de propágulos de HMA en el total de interceptos observados al microscopio (número de intersecciones colonizadas / número total de intersecciones observadas) (Osorio, 2020). A partir, del suelo de cada unidad experimental se realizó extracción de esporas de HMA por la técnica de tamizado, centrifugación en solución de sacarosa y observación en estereoscopio utilizando un aumento de 100X (Zeiss modelo STEMI305) (Osorio, 2020).

2

.7. Análisis de datos

Las variables cuantitativas monitoreadas en el experimento correspondieron a pH, conductividad eléctrica, cantidad de hojas, longitud (cm), diámetro del tallo (cm), número de esporas de hongos micorrízico arbusculares (esp/g) y colonización micorrizal (%). Los datos obtenidos fueron sometidos al análisis de varianza (Prueba F) para determinar si existían diferencias significativas en función de los tratamientos y la prueba de rango múltiple de Duncan para determinar la separación de medias. Para los análisis estadísticos se empleó un nivel de significancia ($P \leq 0.05$) y se utilizó el Software R versión 3.53 (R Development Core Teams, 2016®).

3. Resultados y discusión

3.1. Variables de control pH y Conductividad

La cuantificación y determinación del valor del pH durante la etapa experimental mostró que el valor osciló entre 6,02 a 6,65, con un valor promedio de 6,17 para todas las unidades experimentales de (Figura 1). El pH tiene un papel esencial en los procesos de biosorción de metales por parte de las plantas y en el

desarrollo de la actividad de los microorganismos especialmente en la adaptación, infección y proliferación del HMA asociados a plantas con poder de bioacumulación como lo es el girasol. El pH, además de condicionar la relación entre el ion metálico Pb y la superficie del adsorbente (raíces del girasol) también hace que algunos iones metálicos como el Pb sean más o menos disponibles (Alaboudi et al., 2018).

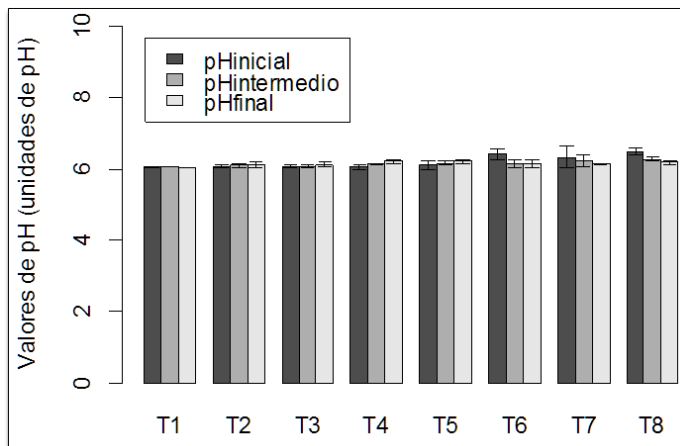


Figura 1. Variación del pH en las diferentes unidades experimentales

El plomo se encuentra más disponible a valores de pH entre 4,0 – 4,5, sin embargo al mantener el valor del pH en el suelo en rangos que abarcan la neutralidad tanto en las unidades experimentales contaminadas con plomo a diferentes niveles como en control se posibilitó mantener la disponibilidad de los iones de plomo en su forma adsorbible en solución del suelo, no obstante también favoreció el nivel de la activación de los grupos funcionales (potenciales centros de adsorción) en la superficie del *Helianthus annuus* micorrizado y su relación con el HMA.

La reacción química que hay entre el ion metálico y el agua es el rol más importante que desempeña el pH en la adsorción de iones metálicos, el plomo al ser un metal de transición se caracteriza por su habilidad para formar complejos de coordinación con

ligandos que poseen pares de electrones libres, en busca de la estabilización de sus orbitales vacantes o parcialmente llenos (Cuizano et al., 2010). La formación de complejos con el agua es regulada por el pH, ya que, a altos valores de pH, la concentración de iones oxhidrilo aumenta en la solución y es capaz de formar hidroxocomplejos, los cuales no solo aumentan el volumen del catión, sino que disminuyen su carga neta, disminuyendo también su afinidad con el adsorbente.

Por otra parte, al analizar los datos obtenidos del monitoreo de la conductividad (Figura 2) se observó que en T1 donde no se aplicó plomo, pero si había inoculación con micorrizas que la conductividad tendió a disminuir en la medida que pasaba el tiempo mostrando diferencias en el valor por el tamaño de los bigotes de las cajas. En el T5 que es el tratamiento donde no se aplicó plomo ni se adicionó micorrizas no se evidencia variabilidad significativa en la conductividad. En los tratamientos T6 a T8 se observó que en la medida que pasaba el tiempo se incrementaba la conductividad, este efecto se asoció con la concentración del Pb, su solubilidad y con la actividad de los HMA. El valor promedio de la conductividad oscilo entre 35,03 y 52,05 μ S/cm. Estos valores de conductividad indican poca presencia de sales en los suelos producto justo del tipo de suelo utilizados en el experimento los cuales son francos arcillosos, tipo de suelo usado para el experimento al ser franco arcilloso. Cala y Kunimine (2003) reportaron valores similares de conductividad en suelos contaminados Pb, mientras que (Travassos et al., 2011) indica que la conductividad máxima en suelos salinos se da hasta un límite máximo de 1500 . El incremento o descenso de la conductividad es un factor altamente dependiente de la variabilidad del pH del suelo ya que a pH ácidos se observa incrementos del valor de la conductividad a 1003 μ S/cm, probablemente por la formación de sulfatos solubles.

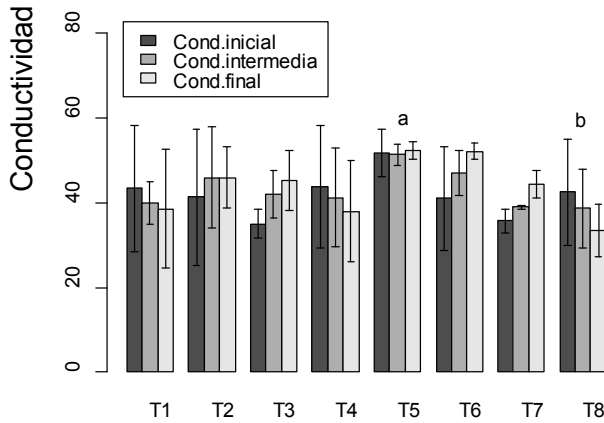


Figura 2. Resultados de conductividad

Los suelos usados se clasifican texturalmente como franco-arcillo arenosos (FAO, 1990), al contener un contenido de arcilla importante (65,5%) esta interactúa con la materia orgánica propia del suelo y la del tipo animal influyendo así, en el valor de la capacidad de intercambio catiónico (C.I.C.) del suelo, el valor del pH, la mineralogía, la textura, así como la naturaleza de los compuestos de plomo contaminantes que pueden presentarse (Cala & Kunimine, 2003; Ruby et al., 1996).

3.2. Número de hojas en el tiempo de *Helianthus annuus*

El monitoreo del número de hojas (Figura 3) evidenció que todos los tratamientos iniciaron con la misma cantidad de hojas durante las dos primeras semanas, a la tercera semana el T1 y T5 que son los tratamientos a los cuales no se les contaminó el suelo con plomo presentan la misma cantidad de hojas de la semana anterior, los demás tratamientos muestran un incremento en sus hojas independiente del nivel de concentración de Pb. T5 tratamiento donde el suelo no fue inoculado con micorrizas fue quien presentó mayor estabilización en el número de hojas durante tres semanas, lo que se explica porque las asociación

micorrizal con entre el HMA y *Helianthus annuus* se da en los primeros 20 días lo que genera una inhibición en el crecimiento de la planta, el cual se compensa a los 60 días de simbiosis (Adesodun et al., 2010).

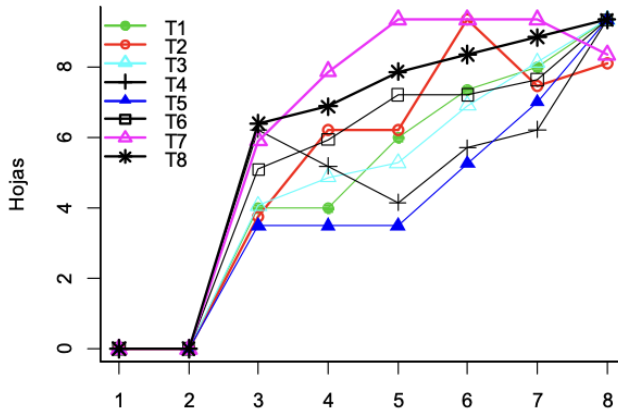


Figura 3. Cuantificación del número de hojas en cada una de las unidades experimentales

3.3. Determinación del crecimiento del *Helianthus annuus*

La valoración en la longitud del *Helianthus annuus* (Figura 4) permitió identificar que el T8 que correspondió a la máxima concentración de plomo (700 ppm) sin inoculación de micorrizas fue quien se presentó mayor crecimiento. Dado que se realizó control de plagas este efecto no fue un impedimento para el desarrollo de las plántulas en cada unidad experimental. Al comparar la longitud alcanzada con lo que reporta (Reyes et al., 2016) se observó que no hubo gran diferencia en la longitud entre los tratamientos con o son micorrizas, y eso es básicamente porque las primeras semanas se da la adaptación de los HMA y por tanto hay mayor exigencia de nutrientes, y en consecuente tanto la planta como el hongo pueden disminuir su crecimiento.

El girasol se caracteriza por presentar gran altura en sus tallos y por mostrar una alta tolerancia a los metales pesados lo cual se verificó en todas las unidades experimentales, donde se observó diferencias (Chirakkara & Reddy, 2015; Govarthan et al., 2018; Pilon-Smits, 2005; Rizwan et al., 2016).

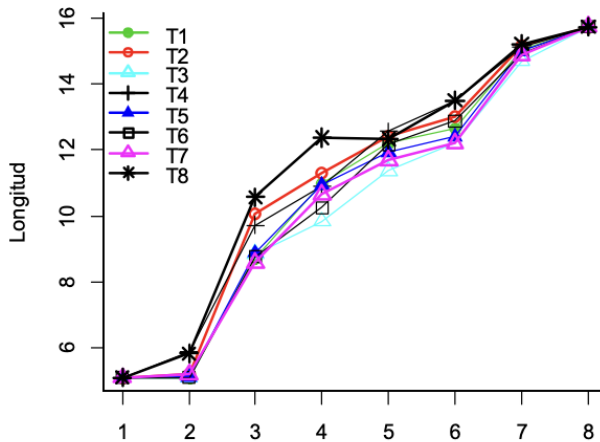
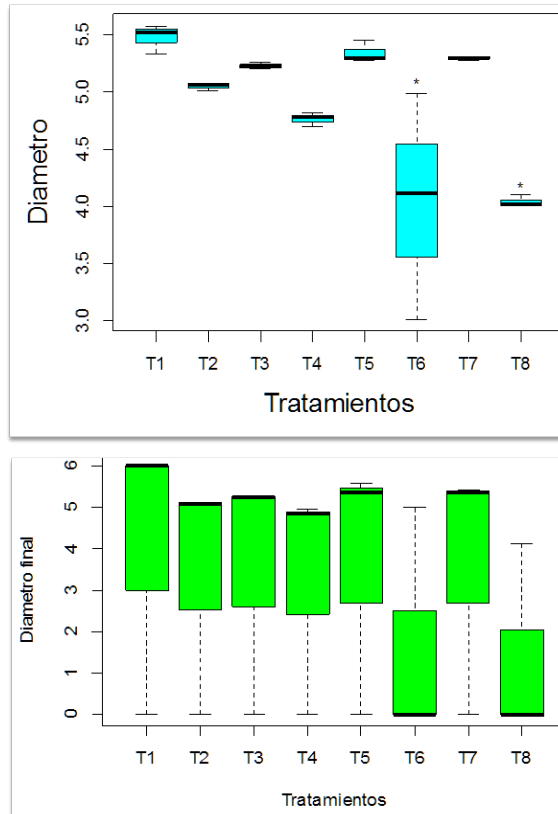


Figura 4. Evolución en la longitud de las plántulas de *Helianthus annuus*

Por otra parte, dado que a nivel de longitud no se observó diferencias en el crecimiento marcadas entre tratamientos, al analizar los datos provenientes de los diámetros del *Helianthus annuus* por cada unidad experimental (Figura 5) se halló que a nivel de tratamientos (Figura 5a) T1 es quien mayor diámetro alcanzo durante el periodo de observación, mientras que T6 fue el tratamiento que mayor dispersión presento en las medidas de los diámetros. El valor de este parámetro en los 8 tratamientos estuvo entre 2-6 cm, valores que concuerda con lo reportado por (Bernal et al., 2007) para suelos contaminados con las mismas dosis de plomo.

De la Figura 5b se puede evidenciar que los tratamientos T6 y T8 que corresponden a las dosis de plomo de 300 y 700 Kg Pb/

Kg suelo el valor de su diámetro no presenta diferencias entre ellos, sin embargo, si las genera cuando se compara con los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5 y T7 estos resultados coinciden con la investigación de (Munive et al., 2020; Peña River & Beltrán Lázaro, 2017). Por otra parte, si se confrontan los diámetros de con y sin inoculación (Figura 5c) se infiere que hay discrepancias entre ellos lo cual se asoció a los HMA los cuales ejercen un efecto benéfico en la adaptación del *Helianthus annuus* a suelos con o sin contaminación de plomo. Los HMA pueden formar compuestos complejos con los cationes de metales pesado como el plomo, lo que se atribuye en gran medida a los ácidos orgánicos.



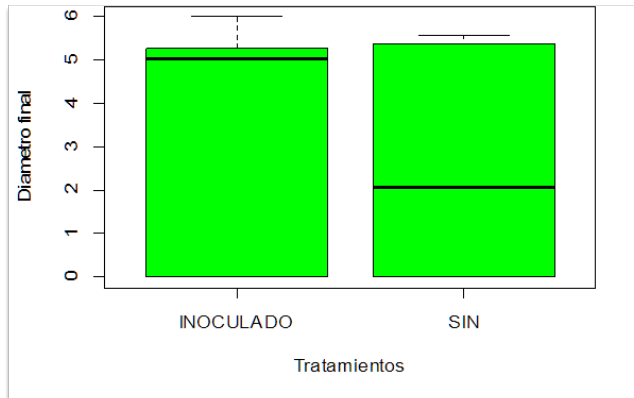


Figura 5. Box plot de los diámetros de *Helianthus annuus*

La cosecha de biomasa transcurridas las 8 semanas (Figura 6) mostró que en los tratamientos donde se inoculó el suelo con HMA generó mayor cantidad de biomasa por unidad experimental. Para las unidades donde se contaminó el suelo que correspondieron a T2, T3 y T4 en promedio se generaron 1,82g de biomasa, mientras que para las unidades donde no se efectuó inoculación el promedio fue de 0,72g. Un aspecto importante en la producción de biomasa fue el índice de supervivencia de las plantas por unidad experimental, de las 3 semillas germinadas sembradas solo en T3 y T5 el índice de sobrevivencia fue del 100%, en T1, T2, T6 y T7 fue del 66,67% y en T4 y T8 del 33,33%.

La concentración de plomo y el aporte de los HMA fueron factores determinantes para la producción de biomasa, aunque el *Helianthus annuus* es una planta que pueden acumular altos contenidos de metales pesados en sus tejidos; dependiendo la etapa de desarrollo y las condiciones climáticas que se produzcan es la cantidad de biomasa que puede generar.

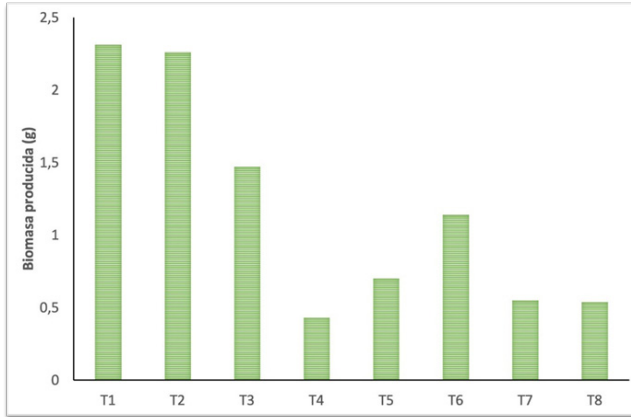


Figura 6. Biomasa cuantificada luego de la cosecha *Helianthus annuus*

En esta investigación se alcanzó a evaluar la etapa vegetativa y la de emergencia flora de la plántula, las cuales no se caracterizan por producir grandes cantidades de biomasa, pero si por que el ápice comienza a diferenciar inflorescencias. Una característica observada en T1y T5 (Tratamientos que no se les aplicó Pb) fue el activo crecimiento de las raíces, significativamente mayor al de la parte aérea. Un aspecto por destacar en el proceso fue que a las 3 semanas todas las unidades experimentales tenían 6 hojas expandidas y se les podía observar que los 2 o 3 primeros pares de hojas se disponían de forma opuesta, y los siguientes lo hacían de modo alternado. Al producirse este cambio meristemático se definió el número de hojas que tendrá la planta, lo que evidenció el alto potencial del *Helianthus annuus* en asimilar el contaminante en su estructura y evidenció que cuando se cuenta con la asociación micorrizal las raíces pueden tener mayor crecimiento el cual luego de los primeros 20 días incide en el alargamiento de la planta. La concentración de plomo sin asociación de HMA presentó menor crecimiento mas no diferenciación en el desarrollo evolutivo de las estructuras como son las hojas. Tanto para el *Helianthus annuus* como para el HMA es esencial las condiciones de temperatura, una alta capacidad de asimilación de luz ya que si estas condiciones no se cuidan se

altera el número final de hojas por planta y por consecuencia la cantidad de Pb que puede remover la planta del suelo.

3.4. Evaluación cualitativa de plomo en suelo y tejido vegetal

La prueba de valoración cualitativa de plomo (Figura 7) permitió identificar en el suelo y en el *Helianthus annuus* el contenido de plomo. Al añadir yoduro de potasio, en los tratamientos que no contenían plomo se observó que, aunque se le adicionara yoduro de potasio no se presentaba el precipitado ni se intensificaba el color amarillo. Esta prueba fueron muy aportantes para verificar el potencial del *Helianthus annuus* en la remoción de plomo.

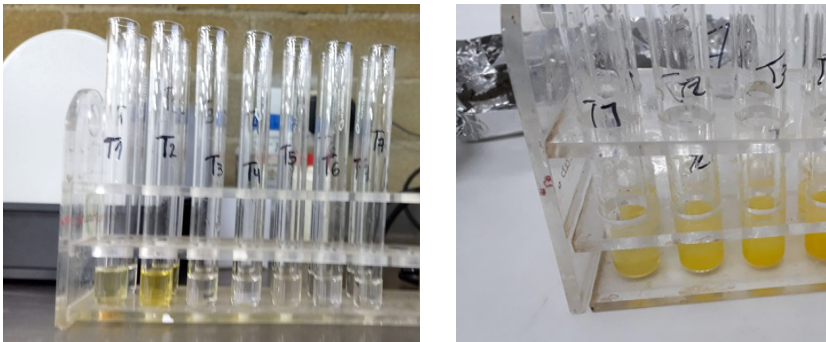


Figura 7. Resultado cualitativo de contenido de plomo en suelo y planta

3.5. Concentración de esporas de los hongos micorrízicos arbusculares

Al analizar los datos provenientes del número de esporas de $45\ \mu\text{m}$ en la caja de bigote se observaron diferencias significativas entre control negativo (T1) y los tratamientos con mayor concentración de plomo, T3 (500 mg Pb/Kg) y T4 (700 mg Pb/Kg) (Figura 8). Se encontró que T1 es quien presentó mayor concentración, en promedio 28 esporas de $45\ \mu\text{m}$ por gramo y 2 esporas de $150\ \mu\text{m}$

por gramo, y en el tratamiento T4 se cuantificó en promedio una concentración de 6 esporas de 45 μm por gramo y en una sola repetición 1 espora de 150 μm en un gramo de suelo. Lo anterior, es concordante con estudios previos que han sugerido que el estrés por metales pesados puede conducir a una disminución en la abundancia de propágulos infectivos de algunas especies de hongos (Mishra et al., 2019). No obstante, entre concentraciones de 500 a 700 mg Pb/Kg se encontró un rango de 6 a 16 esporas de 45 μm por gramo, lo cual supone que estos propágulos de reproducción tienen un grado de resistencia al estar expuestas a condiciones adversas, ya que algunos estudios indican que los miembros del filo Glomeromycota forman una barrera física con los metales pesados tóxicos al producir una proteína llamada glomalina, eficiente para secuestrar diferentes metales pesados (González-Chávez et al., 2004).

En experimentos previos se ha evidenciado que la cantidad de esporas varía con las concentraciones del contaminante en el suelo, teniendo una menor cantidad de estas estructuras micóticas en concentraciones de plomo de 700 mg Pb/Kg (T4). En consecuencia, en el ciclo de vida del hongo micorrizal la multiplicación de esporas se puede ver perjudicada por las concentraciones de plomo en el suelo, lo cual sugiere que en un suelo contaminado con este metal pesado se debe considerar una reinoculación a fin de mantener una concentración óptima de esporas en campo, las cuales al germinar dan origen al crecimiento hifal y posterior colonización intrarradical (García Ávila et al., 2018) y por consiguiente facilitan la adaptación de la planta hospedera. En algunas investigaciones se ha encontrado que, en los suelos con concentraciones de Pb, las plantas micorrizadas han mostrado una mayor defensa contra el estrés por metales pesados, debido a que los hongos micorrízicos arbusculares exhiben actividad antioxidante (Chaturvedi et al., 2018).

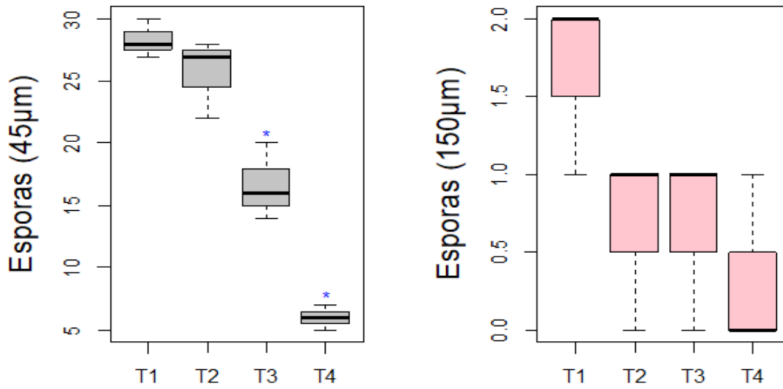


Figura 8. Box plot del número de esporas presentes en suelos contaminados con plomo

3.6. Colonización micorrízico arbuscular en *Helianthus annuus*

Los tratamientos a los cuales se les realizó inoculación de HMA micorrizal presentaron un rango de colonización entre 5-30% y en los tratamientos que no recibieron inoculación no se encontraron propágulos infectivos al interior de la raíz, lo cual indica que el experimento se llevó bajo condiciones controladas evitando contaminación cruzada entre las unidades experimentales. En los suelos con mayor concentración de plomo, T3 (500 mg Pb/Kg) y T4 (700 mg Pb/Kg) se encontró en promedio una colonización de 11% y 5% respectivamente, por el contrario, para el T1 (0 mg Pb/Kg) se obtuvo un nivel de colonización de hasta 30% y para T2 (300 mg Pb/Kg) un porcentaje de colonización de 13%. Estos resultados suponen, que los hongos micorrízicos arbusculares toleran la presencia de metales pesados y su vez permiten la adaptación de la planta huésped, ya que la micorriza arbuscular capta los iones de metales pesados a través de la absorción superficial de las hifas y forma una barrera física entre los metales pesados y la planta huésped, proporcionando así una mayor tolerancia a la planta para sobrevivir en el suelo contaminado (González-Chávez et al., 2004).

Como estrategia de adaptación y tolerancia a los metales pesados, se ha encontrado que algunos hongos endomicorrízicos unen a sus paredes celulares EPTs, mediante componentes como quitina y melanina (Meharg, 2003). Este mecanismo implica la unión de los metales pesados a la pared celular de los hongos, lo que conduce a su posterior acumulación dentro de las vacuolas y arbusculos de las células de hongos y plantas. En todos los tratamientos (T1, T2, T3 y T4) donde se encontró colonización micorrizal se observaron vesículas y micelio intrarradical. Por consiguiente, se puede inferir que la colonización micorrizal es un indicativo del almacenamiento activo de iones metálicos tóxicos, ya que posterior a la colonización inter e intrarradical se producen arbusculos y vesículas (Ferrera-Cerrato & Alarcón, 2007).

En la determinación de la colonización micorrizal no se encontraron porcentajes de colonización superiores a 30%, lo cual es concordante con los hallazgos de algunas investigaciones donde los ecotipos de micorrizas autóctonos del suelo contaminado por metales pesados se adaptan mejor a la toxicidad por metales pesados que los que habitan en los sitios no contaminados, dado que los hongos nativos presentan almacenamiento de iones de metales pesados como formas inactivas dentro de los cuerpos de inclusión celular (Vijver et al., 2004). Sin embargo, este porcentaje sugiere que existe potencial de adaptación del *Helianthus annuus* micorrizado en suelos contaminados con plomo. Se ha determinado que en plantas de girasol (*Helianthus annuus* L.) la colonización micorrizal conduce a una estimulación de la actividad enzimática antioxidante en las raíces, la cual conduce a un proceso adaptativo a la presencia de metales pesados (de Andrade et al., 2008). Por otra parte, a través de la producción de glomalina, una glicoproteína que absorbe metales, se ha reportado que los HMA se pueden adherir al Pb y el Cd formando un complejo con el metal. Incluso se ha observado que, aunque el contenido total de glomalina durante

un período disminuye, la cantidad de metal unido esta proteína aumenta (Peña River & Beltrán Lázaro, 2017).

Teniendo presente que en los suelos con 500 mg Pb/Kg y 700 mg Pb/Kg se encontró una colonización de 11% y 5% respectivamente se considera importante implementar ciclos para reestablecer el cultivo, tanto de la especie vegetal como del inóculo micorrizal, con la finalidad de evitar la diseminación de los iones de metales pesados, puesto que después de alcanzar un umbral dentro de las células micorrízicas, estos pueden ser excretados fuera de las células, proceso realizado por los transportadores de metales pesados ubicados en las membranas de las células vegetales (Merlos et al., 2016), que si bien conduce a un proceso adaptativo de la simbiosis micorrizal puede minimizar la remoción de contaminantes en el suelo.

4. Conclusiones

El *Helianthus annuus* es una planta con una alta capacidad de adaptación y desarrollo en suelos con contenidos de metales pesados a diferentes concentraciones como lo es el plomo. En el experimento se probó que puede tolerar concentraciones equivalentes a 300, 500 y 700 mg Pb/ Kg suelo; sin embargo, el pH del suelo, la humedad, la temperatura y el control de plagas y enfermedades si inciden directamente en el desarrollo de la planta y en consecuencia en su adaptación.

La textura franco-arcillo arenosos de los suelos usados para los tratamientos resultaron ser muy útiles para valorar no solo la adaptación de la planta biocumuladora sino también para generar una interacción con la materia orgánica contenida en el

suelo, así como con la naturaleza de los compuestos de plomo contaminantes que pueden presentarse. Esta textura también tiene una alta incidencia en la conductividad la cual se asocia al contenido de sales que contiene la mineralogía del suelo.

Con esta investigación se pudo verificar que los HMA tienen una relación positiva con la planta bioindicadora que incide directamente en la cantidad de biomasa que puede generar además de aumentar la disponibilidad de plomo cuando se mantiene un pH neutro en los suelos, este efecto se logra por los ácidos orgánicos que por la generación de ácidos orgánicos se moviliza el pH y por lo tanto la interacción entre la planta y el hongo micorrízico juega un papel importante en la supervivencia y el crecimiento exitoso de las plantas en suelos contaminados con metales pesados.

La mayor cantidad de biomasa por unidad experimental de *Helianthus annuus* se dio en los tratamientos donde se inoculó el suelo con HMA 1.82 g, en comparación con 0.72 g para las plantas sin inoculación, lo cual indica el potencial que tiene la simbiosis micorrizal para promover el crecimiento de la planta huésped, proporcionando así una mayor tolerancia de *Helianthus annuus* para sobrevivir en el suelo contaminado.

En los suelos con una concentración de plomo de 500 mg Pb/Kg se encontró en promedio una colonización de 11% y un promedio de 30 esporas por gramo; y en los suelos con una concentración de plomo de 700 mg Pb/Kg se encontró en promedio una colonización de 5% y un promedio de 7 esporas por gramo. Estos resultados indican, que los hongos micorrízicos arbusculares toleran la presencia de metales pesados, no obstante, se debe considerar una reinoculación periódica a fin de conservar a lo largo del tiempo una concentración óptima de propágulos infectivos para garantizar un ciclo de simbiosis activo.

5. Agradecimientos

Agradecemos al Tecnológico de Antioquia por el apoyo, los espacios y equipos brindados para el desarrollo de la investigación. Al semillero de investigación en biotecnología y microbiología agroambiental (SIBIOMA) de la Facultad de Ingeniería.

6. Referencias

- Adesodun, J. K., Atayese, M. O., Agbaje, T. A., Osadiaye, B. A., Mafe, O. F., & Soretire, A. A. (2010). Phytoremediation Potentials of Sunflowers (*Tithonia diversifolia* and *Helianthus annuus*) for Metals in Soils Contaminated with Zinc and Lead Nitrates. *Water, Air, and Soil Pollution*, 207(1-4), 195-201. <https://doi.org/10.1007/s11270-009-0128-3>
- Alaboudi, K. A., Ahmed, B., & Brodie, G. (2018). Phytoremediation of Pb and Cd contaminated soils by using sunflower (*Helianthus annuus*) plant. *Annals of Agricultural Sciences*, 63(1), 123-127. <https://doi.org/10.1016/j.aosas.2018.05.007>
- Alcalá, J., Sosa, M., Moreo, M., Rodríguez, J. C., Quintana, C., Terrezas, C., & Rivero, O. (2009). *Metales pesados en suelo urbano como un indicador de la calidad ambiental: Ciudad de Chihuahua, México*. 18, 53-69.
- Bernal, M. P., Clemente, R., Vazquez, S., & Walker, D. J. (2007). Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar. *Revista Ecosistemas*, 16(2).

- Cala, V., & Kunimine, Y. (2003). *Distribución de plomo en suelos contaminados en el entorno de una planta de reciclaje de baterías ácidas*. 19, 109-115.
- Chaturvedi, R., Favas, P., Pratas, J., Varun, M., & Paul, M. S. (2018). Assessment of edibility and effect of arbuscular mycorrhizal fungi on *Solanum melongena* L. grown under heavy metal(loid) contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 148, 318-326. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.048>
- Chinmayee, M. D., Mahesh, B., Pradesh, S., Mini, I., & Swapna, T. S. (2012). The Assessment of Phytoremediation Potential of Invasive Weed *Amaranthus spinosus* L. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167(6), 1550-1559. <https://doi.org/10.1007/s12010-012-9657-0>
- Chirakkara, R. A., & Reddy, K. R. (2015). Biomass and chemical amendments for enhanced phytoremediation of mixed contaminated soils. *Ecological Engineering*, 85, 265-274. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.09.029>
- Cuizano, N. A., Reyes, Ú. F., Domínguez, S., Llanos, B. P., & Navarro, A. E. (2010). RELEVANCIA DEL pH EN LA ADSORCIÓN DE IONES METÁLICOS MEDIANTE ALGAS PARDAS. *Rev Soc Quím Perú.*, 8.
- de Andrade, S. A. L., da Silveira, A. P. D., Jorge, R. A., & de Abreu, M. F. (2008). Cadmium Accumulation in Sunflower Plants Influenced by Arbuscular Mycorrhiza. *International Journal of Phytoremediation*, 10(1), 1-13. <https://doi.org/10.1080/15226510701827002>
- Eckstein, J., Erlen, B., & Benz, K. W. (1992). High purity lead iodide for crystal growth and its characterization. *Materials Research Bulletin*, 27(5), 537-544. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(92\)90141-L](https://doi.org/10.1016/0025-5408(92)90141-L)
- EPA. (2016). *Remediation Technology Descriptions for Cleaning Up Contaminated Sites* [Remediation Technologies]. United

States Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/remedytech/remediation-technology-descriptions-cleaningcontaminated-sites>

- FAO. (1990). *Soil map of the world (Revised Legend)*.
- Ferrera-Cerrato, R., & Alarcón, A. (2007). *Microbiología agrícola hongos, bacterias, micro y macrofauna, control biológico y planta-microorganismo*. Editorial Trillas.
- García Ávila, C., Villada Sierra, L. A., & Robayo Gómez, J. (2018). *Evaluación de la adaptación de Helianthus annuus en asociación con hongos micorrízicos en suelos contaminados con plomo*. 10, 93-111.
- González-Chávez, M. C., Carrillo-González, R., Wright, S. F., & Nichols, K. A. (2004). The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements. *Environmental Pollution*, 130(3), 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.01.004>
- Govarthanan, M., Mythili, R., Selvankumar, T., Kamala-Kannan, S., & Kim, H. (2018). Myco-phytoremediation of arsenic- and lead-contaminated soils by *Helianthus annuus* and wood rot fungi, *Trichoderma* sp. isolated from decayed wood. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 151, 279-284. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.020>
- Gupta, D. K., Huang, H. G., & Corpas, F. J. (2013). Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(4), 2150-2161. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1485-4>
- ICONTEC. (2018). *Bioinsumos para uso agrícola. Inoculantes biológicos. Requisitos*.
- IDEAM. (2018). *Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos*. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434a-a235-91baee8c73fc>

- Kachenko, A. G., Singh, B., & Bhatia, N. P. (2007). *Heavy metal tolerance in common fern species*. 55, 63-73. <https://doi.org/10.1071/BT06063>
- Krueger, E., Darland, J., Goldyn, S., Swanson, R., Lehmann, R., Shepardson, S., & Karpovich, D. (2013). Water Leaching of Chelated Pb Complexes from Post-Phytoremediation Biomass. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(8), 1615. <https://doi.org/10.1007/s11270-013-1615-0>
- Mahler, R. L. (2004). General overview of nutrition for field and container crops. *National Proceeding: Forest and Conservation Nursery Associations*, 9-12.
- Meharg, A. A. (2003). The mechanistic basis of interactions between mycorrhizal associations and toxic metal cations. *Mycological Research*, 107(11), 1253-1265. <https://doi.org/10.1017/S0953756203008608>
- Merlos, M. A., Zitka, O., Vojtech, A., Azcón-Aguilar, C., & Ferrol, N. (2016). The arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizophagus irregularis* differentially regulates the copper response of two maize cultivars differing in copper tolerance. *Plant Science*, 253, 68-76. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.09.010>
- Mishra, A., Bhattacharya, A., & Mishra, N. (2019). Mycorrhizal symbiosis: an effective tool for metal bioremediation. In *New and Future Developments in Microbial Biotechnology and Bioengineering* (pp. 113-128). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818258-1.00007-8>
- Moreno, J. D. (2011). *Propuesta de diseño en batch para remoción de plomo (II) desde solución acuosa, empleando un material adsorbente cubano*. 2, 1-5.
- 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), 177-186. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.02.04>

- OMS. (2019, agosto 23). *Intoxicación por plomo y salud*. World Health Organization. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>
- Osorio, N. W. (2020). *Biología y fertilidad del suelo - manual para el estudio de propiedades físicas, químicas y biológicas de la fertilidad del suelo*. Universidad Nacional de Colombia.
- Peña River, F. D. M., & Beltrán Lázaro, E. (2017). Aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados utilizando *Helianthus annuus* L. en la Estación Experimental El Mantaro. *Prospectiva Universitaria*, 9(1), 31. <https://doi.org/10.26490/uncp.1990-7044.2012.1.291>
- Pilon-Smits, E. (2005). *Phytoremediation*. 56, 15-39.
- Pineda, H. R. (2004). *Presencia de hongos micorrízicos arbusculares y contribución de *Glomus intraradices* en la absorción y translocación de cinc y cobre en girasol (*Helianthus annuus* L.) crecido en un suelo contaminado con residuos de mina*. [Tesis Doctoral en Biotecnología]. Universidad de Colima.
- R Development Core Teams. (2016). *R: A language and environment for statistical computing*. R foundation for statistical computing.
- Reyes, Y. C., Vergara, I., Torres, O. E., Díaz, M., & González, E. E. (2016). CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS: IMPLICACIONES EN SALUD, AMBIENTE Y SEGURIDAD ALIMENTARIA. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, 16(2). <https://doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>
- Rizwan, M., Ali, S., Rizvi, H., Rinklebe, J., Tsang, D. C. W., Meers, E., Sik Ok, Y., & Ishaque, W. (2016). Phytomanagement of heavy metals in contaminated soils using sunflower: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 46(18), 1498-1528.
- Ruby, M. V., Davis, A., Schoof, R., Eberle, S., & Sellstone, C. M. (1996). *Estimation of lead and arsenic bioavailability using a physiologically based extraction test*. 30(2), 422-430.

- Saa, G. R., & Victoria, J. A. R. (2011). Metodologías para establecer valores de referencia de metales pesados en suelos agrícolas: Perspectivas para Colombia. *Acta Agronómica*, 16.
- Sanín, L. H., González-Cossío, T., Romieu, I., & Hernández-Avila, M. (1998). Acumulación de plomo en hueso y sus efectos en la salud. *Salud Pública de México*, 40(4). <https://doi.org/10.1590/S0036-36341998000400009>
- Schneider, J., Bundschuh, J., & do Nascimento, C. W. A. (2016). Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation of a lead-contaminated site. *Science of The Total Environment*, 572, 86-97. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.185>
- SEMARNAT. (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación.
- Travassos, K. D., Soares, F. A. L., Gheyi, H. R., Dias, N. da S., & Nobre, R. G. (2011). Crescimento e produção de flores de girassol irrigado com água salobra. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, 5(2), 123-133. <https://doi.org/10.7127/rbai.v5n200036>
- Vierheilig, H., Coughlan, A. P., Wyss, U., & Piché, Y. (1998). *Ink and Vinegar , a Simple Staining Technique for Arbuscular-Mycorrhizal Fungi*. 64, 5004–5007.
- Vijver, M. G., van Gestel, C. A. M., Lanno, R. P., van Straalen, N. M., & Peijnenburg, W. J. G. M. (2004). Internal Metal Sequestration and Its Ecotoxicological Relevance: A Review. *Environmental Science & Technology*, 38(18), 4705-4712. <https://doi.org/10.1021/es040354g>
- Weis, J. S., & Weis, P. (2004). Metal uptake, transport and release by wetland plants: implications for phytoremediation and restoration. *Environment International*, 30(5), 685-700. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.002>

Zurera, G., Estrada, B., Rincón, F., & Pozo, R. (1987). Lead and cadmium contamination levels in edible vegetables. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 38(5), 805-812. <https://doi.org/10.1007/BF01616705>

Capítulo 3

Uso de bioenmiendas y su interacción con la dinámica bacteriana en la rizósfera de *Senna atomaria* para la rehabilitación de áreas degradadas por minería de carbón³

*Use of bio-amendments and its interaction with bacterial dynamics in the rhizosphere of *Senna atomaria* for the rehabilitation of degraded areas by coal mining.*

³ Autores: Domínguez Rave, María Isabel, Ríos Montes, Karina, Castro Restrepo, Dagoberto. Universidad católica de Oriente. GDCON, Universidad de Antioquia. Medellín. Colombia.

RESUMEN

El uso de bioenmiendas para la rehabilitación de suelos contaminados y degradados por la minería de carbón, tiene un reconocido potencial para abordar múltiples aspectos concernientes al secuestro eficiente de carbono, mejoramiento de la fertilidad y estructura del suelo. Adicionalmente, las enmiendas ejercen un rol importante como hospedero de microorganismos del suelo, y se ha demostrado que estos materiales inducen cambios en la abundancia, diversidad y estructura de las comunidades bacterianas en periodos cortos de tiempo. El objetivo del presente trabajo fue estudiar la estructura temporal de las comunidades bacterianas de la rizósfera de la especie vegetal *Senna atomaria*, empleada para la rehabilitación de suelos disturbados y evaluar el efecto de diferentes bioenmiendas sobre la colonización y abundancia bacteriana de la rizósfera empleando herramientas de la metagenómica. Se encontró que el uso de las enmiendas de biochar y micorrizas favoreció el establecimiento, abundancia y estructura de las comunidades bacterianas en la especie *Senna atomaria*. Estos resultados plantean una posible ruta exitosa en el establecimiento de especies vegetales en procesos de rehabilitación de suelos mineros usando bioenmiendas como potenciadores de la interacción rizósfera-planta-suelo.

Palabras clave: *Senna atomaria*, bioenmiendas, rizósfera bacteriana, recuperación de zonas degradadas.

ABSTRACT

The use of organic amendments for the rehabilitation of contaminated and degraded soils by coal mining has a recognized potential to address multiple aspects concerning efficient carbon sequestration, improvement of soil fertility and structure. Additionally, amendments play an important role as a host for soil microorganisms, and it has been shown that these materials induce changes in the abundance, diversity and

structure of bacterial communities in short periods of time. The objective of this study was to study the temporal structure of the bacterial communities of the rhizosphere of the *Senna atomaria* plant species, used for the rehabilitation of disturbed soils and to evaluate the effect of different organic amendments on the colonization and bacterial abundance of the rhizosphere using tools of metagenomics. It was found that the use of biochar and mycorrhizal amendments favored the establishment, abundance and structure of bacterial communities in the *Senna atomaria* species. These results suggest a possible successful route in the establishment of plant species in mining soil rehabilitation processes using bio-amendments as enhancers of the rhizosphere-plant-soil interaction.

Key words: *Senna atomaria*, organic amendments, bacterial rhizosphere, restoration of degraded areas

1. Introducción

La minería de carbón trae consigo impactos adversos al suelo, alterando su estructura y ocasionando una severa pérdida de nutrientes y biodiversidad (Ussiri et al., 2014; Xiao et al., 2014). En las zonas transformadas y afectadas por la actividad minera, el sustrato empleado en la restauración cumple un papel fundamental, pues de sus propiedades dependerá el restablecimiento de la vegetación. La recuperación de este tipo de suelos disturbados consiste en el proceso de retornar el suelo a un estado que involucra la restauración de su topografía a un contorno similar al original; es así, que un aspecto fundamental en el proceso de rehabilitación del terreno considera los aspectos relacionados con la puesta en marcha del sistema suelo-vegetación que parte de la reposición de materiales edáficos preservados combinados con los estériles procedentes de la extracción carbonífera, con el fin de establecer una nueva cobertura vegetal.

La restauración puede verse como un nuevo modelo para el desarrollo sostenible. La recuperación de tierras degradadas se hace necesaria para controlar los diferentes procesos erosivos, valores estéticos en la tierra, y así mismo controlar el ciclo hidrológico (Rosales et al., 1997). Los procesos de rehabilitación son exitosos si se establecen algunas características de los ecosistemas originales; teniendo éxito sólo si, después de un tratamiento apropiado del suelo, también se seleccionan las

especies nativas apropiadas para este fin (Bradshaw, 1987). Las especies colonizadoras de áreas degradadas son indicadores de ambientes recientemente creados en tierras degradadas; y uno de los factores básicos directamente relacionados con la capacidad colonizadora y la reproducción, es la capacidad natural de las especies vegetales para colonizar áreas degradadas. Además, las especies que toleran entornos estresantes y muy perturbados que se asemejan a las nuevas condiciones de las tierras disturbadas también pueden utilizarse en la restauración.

El uso de enmiendas orgánicas para la recuperación y rehabilitación de suelos contaminados tiene un reconocido potencial para abordar múltiples aspectos concernientes al secuestro eficiente de carbono (Lehmann et al., 2006), incremento de la productividad agrícola, fertilidad del suelo (Zhang et al., 2016), y mejoramiento de la restauración ambiental (Beesley et al., 2011). En adición, las enmiendas pueden ejercer un rol importante como hospedero de microorganismos del suelo. Se ha demostrado que estos materiales inducen cambios en las comunidades microbianas del suelo, que son inicialmente atribuidos a microorganismos degradadores estimulados por fuentes de carbono orgánico lábil, en periodos cortos de tiempo (Beesley et al., 2011; G. Xu et al., 2012).

El microbioma que integra la rizósfera puede ser considerado una extensión activa del sistema de raíz (Philippot et al., 2013), caracterizándose por una intensa actividad microbiana debido a la cantidad y diversidad de exudados liberados por la raíz. La cantidad y composición de estos exudados, si bien dependen de diversos factores ambientales, promueven una estructura microbiana más activa y diversa (Haichar et al., 2008). Estos microorganismos asociados a la raíz contribuyen a la absorción y fijación de nutrientes, mejorando así el rendimiento de la planta y consecuentemente, las propiedades del suelo.

La caracterización de la estructura microbiana de la rizósfera de la especie de planta empleada para la rehabilitación de suelos disturbados, provee una información importante, en cuanto arroja un screening de los posibles grupos y mecanismos funcionales, e interacciones durante el proceso de revegetación. Entender la influencia de las enmiendas orgánicas sobre la diversidad y función de las comunidades microbianas puede proveer la línea base necesaria para el desarrollo de tecnologías en el mejoramiento de suelos degradados y/o el mantenimiento de la salud del mismo.

El enfoque de los métodos metagenómicos es prometedor para evaluar la función de comunidades microbianas relativas a las enmiendas, tipo de suelo y otros factores edáficos, así como para establecer el rol del ambiente físico del suelo en las interacciones entre suelo-comunidades microbianas-planta. En este orden de ideas, los métodos de secuenciación no sólo permiten determinar la estructura filogenética de las comunidades microbianas, sino también predecir los componentes funcionales del microbioma asociado al DNA extraído a partir de suelos enmendados (Yao et al., 2017; Zhang et al., 2016). Las tecnologías de secuenciación de nueva generación acopladas a las plataformas bioinformáticas, tienen el potencial de mejorar significativamente el entendimiento del efecto de enmiendas sobre las comunidades microbianas del suelo y de la rizósfera.

En el presente documento de trabajo se expone el análisis preliminar de resultados de una investigación que abordó el estudio de la dinámica bacteriana asociada a la rizósfera de *Senna atomaria*, especie asociada a procesos de rehabilitación de suelos disturbados por extracción carbonífera, aplicando diferentes enmiendas orgánicas. Así mismo, su aporte llega a ser relevante en el marco de los objetivos de desarrollo sostenible, debido a que la búsqueda de estrategias que integren la revegetalización con especies pioneras, nativas y altamente colonizadoras asociadas a la aplicación de enmiendas para rehabilitar zonas

degradadas por la actividad antrópica minera es imprescindible para el restablecimiento de los ecosistemas terrestres que fueron fragmentados como consecuencia de dicha intervención.

2. Metodología

2.1 Área de estudio

La zona de estudio se ubica en distrito minero de la Jagua (municipio de la Jagua de Ibirico) en el departamento del Cesar, la zona de estudio se ubica dentro de la zona de vida Bosque Seco Tropical (bs-T) (Holdridge & Jiménez Saa, 1978), con una temperatura promedio entre 34 y 39°C (piso térmico cálido), la precipitación media anual es de 1.940 mm, en régimen bimodal, con dos períodos húmedos: entre abril y junio, en los que se presenta el 31% de la precipitación anual, y entre agosto y noviembre, que corresponde al 53% (CORPOCESAR, 1997).

2.2 Diseño experimental

El experimento consistió en tres tratamientos (control, bioenmienda-biochar, bioenmienda-micorrizas) con tres réplicas independientes correspondiente a un modelo experimental de bloques completamente aleatorios (Tabla 1), cuya unidad experimental fue el suelo rizosférico asociado a *Senna atomaria*, especie utilizada como planta modelo en el proceso de rehabilitación. Las semillas de esta especie vegetal fueron colectadas directamente en el área de estudio; mediante condiciones ambientales controladas (temperatura y humedad) fueron germinadas en el vivero de la Universidad Popular del Cesar. Tres meses después de la germinación, las plántulas fueron sembradas de manera aleatoria a lo largo de las parcelas delimitadas (45 x 5 m²). El establecimiento y desarrollo de la

especie vegetal estuvo sujeto a las misma textura, composición y propiedades del suelo de las parcelas, y a los mismos factores ambientales y climáticos; lo que diferenció una parcela de otra fue la bioenmienda aplicada en el suelo degradado al momento de la siembra. Siete meses fueron determinados como periodo de establecimiento y adaptación de la planta en cada una de las parcelas, y cumplido este periodo se procedió a la etapa de muestreo.

Parcelas	Tratamiento
P1_S	Control (Suelo estéril de mina + <i>S. atomaria</i>)
P3_S	Suelo estéril de mina + Biochar + <i>S. atomaria</i>
P8_S	Suelo estéril de mina + Micorrizas + <i>S. atomaria</i>

Tabla 1. Modelo experimental de bloques completamente aleatorios. Cada tratamiento independiente con series de tres réplicas.

2.3 Muestreo

Correspondió a un muestreo aleatorio de suelo rizosférico de unidades seleccionadas completamente al azar, el sistema de raíces y el suelo adherido a la planta fue sacudido suavemente para separar la rizósfera de las raíces y continuar con la extracción del ADN, amplificación del gen 16S-ARNr, y posterior secuenciación. Para la toma de raíces se seleccionaron tres individuos de la especie plantada de manera aleatoria a lo largo de las parcelas P1, P3 y P8, los cuales fueron extraídas del suelo cuidadosamente para no romper las raíces finas.

2.4 Extracción del DNA y Amplificación del gen 16S-ARNr

El ADN del suelo rizosférico fue extraído de manera independiente a partir de cada tratamiento en los dos tiempos de colección usando el kit de extracción E.Z.N.A® Soil DNA (Omega Bio-tek, USA), y siguiendo el protocolo del fabricante. El ADN extraído fue cuantificado y su pureza se verificó en una relación A260/280

nm (Nanodrop™ 2000, Thermo Scientific, USA), y mediante electroforesis en gel de agarosa al 1% w/v, previamente a su almacenamiento a -20 °C. Posteriormente, el ADN obtenido de cada extracción independiente fue usado como templado para amplificar la región V3 del gen 16S ARNr.

2.5 Secuenciación

El flujo de trabajo en la plataforma Illumina NGS incluyó los siguientes cuatro pasos básicos: (i) preparación de la muestra para la construcción de la biblioteca de ADN_r-16SV3: extracción del ADN de las muestras y posterior control de calidad. Las muestras calificadas proceden a la construcción de la biblioteca; (ii) construcción de la biblioteca: la biblioteca de secuenciación se prepara mediante fragmentación aleatoria de la muestra de ADN o ADN_c, seguida por la ligación del adaptador 5' y 3'. Alternativamente, la “tagmentation” combina la fragmentación y la ligadura, reacciones en un solo paso que aumenta en gran medida la eficiencia del proceso de preparación de la biblioteca. Los fragmentos ligados al adaptador se amplifican por PCR y se purifican en gel; (iii) secuenciación: para la generación de clústers, la biblioteca se carga en una celda de flujo donde se capturan fragmentos de oligos unidos a superficie y complementarios a los adaptadores de la biblioteca. Cada fragmento se amplifica en distintos grupos clonales, y cuando se completa la generación del clúster, las plantillas están listas para generar la secuencia. La tecnología Illumina SBS utiliza un método patentado basado en un terminador reversible que detecta bases individuales a medida que se incorporan a las cadenas de la plantilla de ADN. Los dNTP (oligonucleótidos) vinculados al terminador son perseverantes durante cada ciclo de secuencia, y la competencia natural minimiza el sesgo de incorporación y reduce en gran medida las tasas de error sin procesar en comparación con otras tecnologías. El resultado es una secuencia de base por base altamente precisa que prácticamente elimina del contexto errores de la secuencia específica, incluso dentro de regiones de secuencias repetitivas; (iv) datos crudos: son los datos resultantes de la secuenciación que se convierten en datos sin procesar para el análisis.

2.6 Análisis de datos

Los datos crudos se convirtieron en archivos FASTQ utilizando el paquete illumina bcl2fastq, y posteriormente, se usó el software QIIME versión 1.9.0 y 2.0 (Caporaso et al., 2010) para analizar las secuencias al 97% de similitud con bases de referencia abierta usando el algoritmo USEARCH (Edgar, 2010), y agruparlas en unidades taxonómicas operacionales (OTUs por su sigla en inglés). Adicionalmente, se calculó la abundancia relativa de diferentes niveles taxonómicos en cada muestra y se llevó cabo el análisis de alfa diversidad.

3. Resultados

3.1 Análisis taxonómico

En todas las muestras, la composición de las comunidades rizobacterianas estuvo dominada por los fila Actinobacteria, Firmicutes y Proteobacteria los cuales abarcaron un promedio del 34,65%, 32,62% y 20,24%, respectivamente. Los fila Acidobacteria y Chloroflexi constituyeron una abundancia relativa del 3,01% y 2,44%, respectivamente. No obstante, se registró un promedio del 2,67% de los datos como no clasificados. En cuanto a filum, el análisis de los datos no permitió establecer que la abundancia de las comunidades rizobacterianas fuera significativamente afectada por alguno de los tratamientos empleados en el estudio, dado que, al ser comparados con el control, no se observaron diferencias significativas. No obstante, se observó que en la parcela ocho (P8) colonizada por micorrizas, se favoreció el establecimiento de las comunidades pertenecientes al filum Firmicutes. Al comparar la parcela uno (P1) con las parcelas tres (P3) y ocho (P8), pareció que las bioenmiendas de biochar y micorrizas favorecieron el incremento de la abundancia de las comunidades asociadas al filum Actinobacteria (Figura 1). Los

fila menos representativos del estudio ocuparon un promedio menor al 2% de abundancia relativa, entre estos se destacan los fila Cyanobacteria, Planctomycetes y Verrucomicrobia (Figura 2).

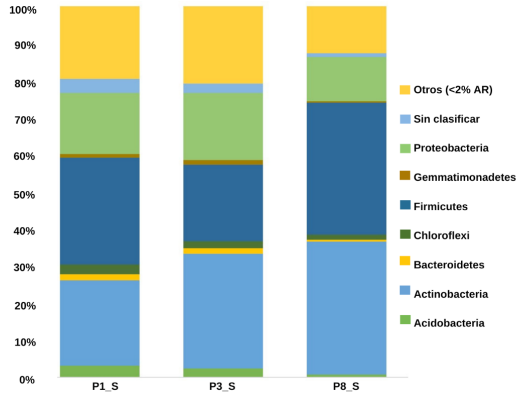


Figura 1. Fila bacterianos dominantes representados en abundancia relativa por tratamiento aplicado a las parcelas. Descripción del tratamiento: P1_S (control + *S. atomaria*); P3_S (biochar + *S. atomaria*); P8_S (Micorriza + *S. atomaria*).

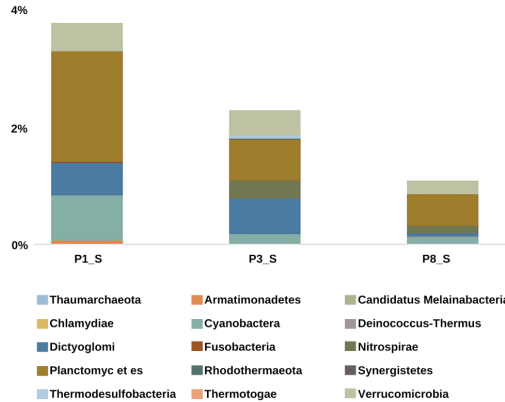


Figura 2. Abundancia relativa de los fila menos representativos por tratamiento aplicado a las parcelas. Descripción del tratamiento: P1_S (control + *S. atomaria*); P3_S (biochar + *S. atomaria*); P8_S (Micorriza + *S. atomaria*).

Las familias más abundantes del filum Actinobacteria incluyeron: Streptomycetaceae, Pseudonocardiaceae, Solirubrobacteraceae y Gaiellaceae. En las parcelas con las enmiendas de biochar y micorrizas, se registró un incremento en la abundancia relativa de las familias comparadas con el tratamiento control sembrado con *Senna atomaria*, específicamente miembros de las familias Streptomycetaceae en P3, con una abundancia relativa del 6,17%; y miembros de las familias Thermomonosporaceae y Nocardioideaceae en P8, con unas abundancias relativas de 6,52% y 6,68%, respectivamente. Los hallazgos anteriores conllevan a inferir que estos tratamientos parecieron tener un efecto en la composición y distribución de las comunidades bacterianas asociadas a la rizósfera de la planta. (Figura 3A).

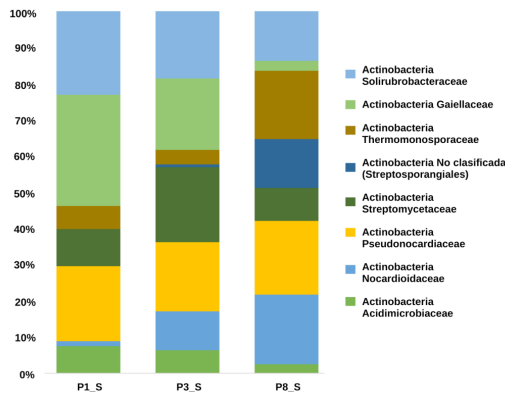


Figura 3A. Abundancia relativa de las familias dominantes de los fila Actinobacteria (A), Firmicutes (B) y Proteobacteria (C). En Others están agrupados las nominaciones con un porcentaje menor al 1%. Descripción del tratamiento: P1_S (control + *S. atomaria*); P3_S (biochar + *S. atomaria*); P8_S (Micorriza + *S. atomaria*).

En cuanto a las familias del filum Firmicutes, las más abundantes en su orden de distribución fueron: Bacillaceae y Streptococcaceae, y entre estas dos, la mayor abundancia relativa fue determinada por miembros de la familia Bacillaceae con un 26,55%, la cual se

asoció al tratamiento con la enmienda de micorrizas. En relación con estos hallazgos, resultó interesante observar que al parecer la planta *Senna atomaria* respondió mejor a este tratamiento.

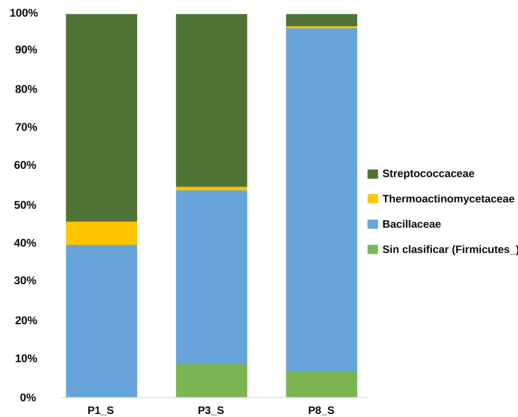


Figura 3B. Abundancia relativa de las familias dominantes de los fila Actinobacteria (A), Firmicutes (B) y Proteobacteria (C). En Others están agrupados las nominaciones con un porcentaje menor al 1%. Descripción del tratamiento: P1_S (control + *S. atomaria*); P3_S (biochar + *S. atomaria*); P8_S (Micorriza + *S. atomaria*).

Las familias Pseudomonadaceae, Sphingomonadaceae y Rhodospirillaceae fueron las más abundantes del filum Proteobacteria. De manera particular, se observó que el tratamiento con biochar estimuló la abundancia relativa de los miembros de la familia Sphingomonadaceae (4,03%); mientras que el tratamiento con micorrizas pareció estimular la abundancia y dominancia de comunidades asociadas a la familia Rhodospirillaceae (4,84%). De manera general, se pudo observar que los tratamientos con biochar y micorrizas al ser comparados con el control, parecieron tener una influencia en la composición y abundancia de las comunidades rizobacterianas (Figura 3C).

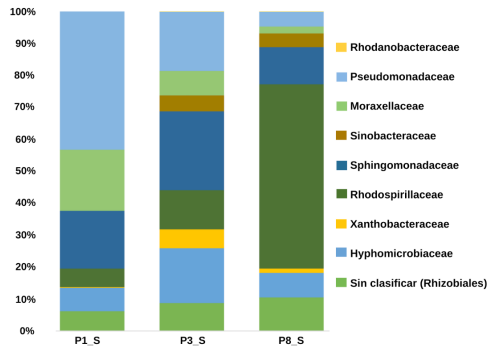


Figura 3C. Abundancia relativa de las familias dominantes de los fila Actinobacteria (A), Firmicutes (B) y Proteobacteria (C). En Others están agrupados las nominaciones con un porcentaje menor al 1%. Descripción del tratamiento: P1_S (control + *S. atomaria*); P3_S (biochar + *S. atomaria*); P8_S (Micorriza + *S. atomaria*).

La clasificación de género reveló que *Gaiella*, *Solirubrobacter*, *Bacillus*, *Lactococcus*, *Sphingomonas* y *Pseudomonas* fueron los miembros más representativos de las parcelas con los diferentes tratamientos, destacándose los géneros *Bacillus* y *Lactococcus* con un promedio en su abundancia relativa del 13,19% y 8,44%, respectivamente. En comparación con el tratamiento control, la abundancia de estos dos géneros fue influenciada en mayor proporción por el tratamiento con micorrizas. En cuanto a la población de *Sphingomonas*, el tratamiento con biochar pareció tener una mayor influencia sobre su abundancia. Por otro lado, los géneros *Gaiella*, y *Solirubrobacter* fueron los más abundantes en los tratamientos: control (P1) y biochar (P3).

En los estudios de taxonomía bacteriana es relevante poder llegar hasta el nivel taxonómico de especie, de tal manera que puedan llegar a establecerse fenotipos de interés biológico asociados a un tratamiento en particular. En el presente trabajo, se destacaron por su abundancia algunas especies tales como: *Solirubrobacter ginsenosidimutans* (familia Solirubrobacteraceae), *Flindersiella endophytica* (familia Nocardioidaceae), *Gaiella occulta* (familia Gaiellaceae), *Streptomyces glaucus* (familia Streptomycetaceae),

Bacillus oryzae y *Bacillus wiedmannii* (familia Bacillaceae), al igual que *Lactococcus piscium* (familia Streptococcaceae) y *Pseudomonas versuta* (familia Pseudomonadaceae). Por otro lado, se destacó entre los tratamientos, *Sphingomonas limnosediminicola*, especialmente en la parcela con la enmienda de biochar; mientras que la abundancia de las especies *Lactococcus piscium*, *Bacillus oryzae* y *Bacillus wiedmannii*, pareció verse favorecida por el tratamiento con micorrizas. Finalmente, las especies *Gaiella occulta* y *Solirubrobacter ginsenosidimutans*, fueron promovidas en los tratamientos con biochar y micorrizas, en comparación con el tratamiento control, respectivamente.

3.2 Análisis de la diversidad alfa

Los valores de OTUs observados, de Chao1, y los índices de Shannon y Simpson, están indicados en la tabla 2 para cada tratamiento. Todos los tratamientos presentaron una diferencia en la riqueza de especies observada al compararse con el tratamiento control. Al comparar la diversidad de géneros se observó que el tratamiento adicionado con la enmienda de biochar, los OTUs observados fueron más altos en relación al tratamiento control para la especie vegetal empleada en el estudio. Los índices de Shannon y Simpson indican que la riqueza y dominancia de las comunidades rizobacterianas en el tratamiento con biochar, fue favorecida en la rizósfera de *Senna atomaria* (Figura 4).

Muestra	Tratamiento	OTU Observado	Chao1	Índice Shannon	Índice Simpson
7 Meses Postsiembra <i>S. atomaria</i>					
Control	P1_S	601	687	6.684	0.968
Biochar	P3_S	1039	1299	7.791	0.985
Micorriza	P8_S	714	929	6.503	0.960

Tabla 2. Valores de OTU observado, Chao1, índices Shannon y Simpson. Estimación de la diversidad de las comunidades rizobacterianas, sujeta a los diferentes tratamientos en el proceso de rehabilitación.

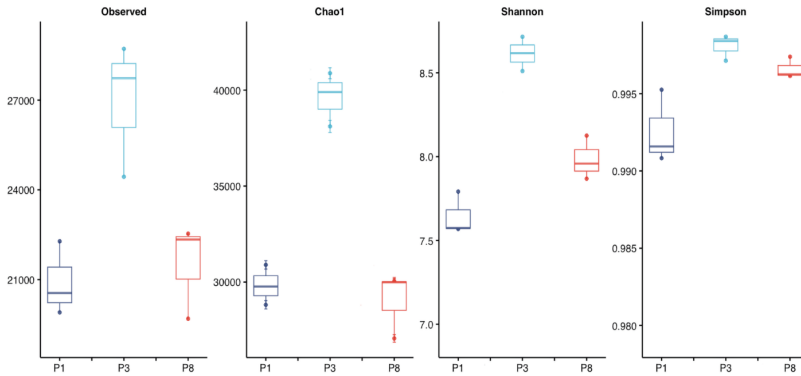


Figura 4. Medidas de Alfa Diversidad para las comunidades rizobacterianas de *S. atomaria* sujeta a los tratamientos con biochar y micorrizas. Descripción del tratamiento: P1 (control + *S. atomaria*); P3 (biochar + *S. atomaria*); P8 (Micorriza + *S. atomaria*).

4. Discusión y conclusiones

En este trabajo se evaluaron los cambios en la abundancia y composición de las comunidades bacterianas de la rizósfera de *S. atomaria* relacionados con la adición de biochar y micorrizas en el suelo disturbado por la actividad minera. Los cambios cíclicos que ocurren en la rizósfera han sido ampliamente discutidos en la literatura, permitiendo concluir que éstos tienen un impacto subsecuente en la composición, diversidad y actividad de las comunidades microbianas (Fernández-Calviño & Bååth, 2010). Se ha sugerido que en presencia de biochar, las complejas reacciones en la rizósfera pueden ocurrir en la superficie de esta partícula intensificando las interacciones entre raíces y pelos radiculares con un efecto relevante en la actividad microbiana

(Joseph et al., 2010). En ese mismo sentido, la evaluación tanto de la presencia de micorrizas como de los atributos reproductivos de las plantas colonizadoras son importantes para un programa de restauración que involucre vegetación autosostenible (Díaz Muegüe et al., 2013).

El cambio en la dinámica de las comunidades microbianas pudo observarse en las parcelas con las diferentes enmiendas, específicamente en las comunidades rizobacterianas de los filo Firmicutes (familia Bacillaceae y Streptococcaceae), Actinobacteria (familias Streptomyetaceae, Pseudonocardiaceae, Solirubrobacteraceae y Gaiellaceae) y Proteobacteria (familias Pseudomonadaceae, Sphingomonadaceae y Rhodospirillaceae), siendo algunas de estas las más abundantes en las muestras correspondientes a las parcelas tratadas con biochar y micorrizas.

Por otra parte, los resultados de este estudio indican que al parecer hubo una interacción positiva entre el biochar, la micorriza inoculada y las raíces de la planta *Senna atomaria*. En relación a este aspecto, se ha propuesto que los compuestos volátiles de algunos tipos de biochar podrían tener un efecto en el crecimiento de la raíz de la planta (Amonette & Stephen, 2009). Los suelos acondicionados con biochar experimentan modificaciones significativas en la estructura de las comunidades microbianas del suelo y un incremento en la diversidad. Algunos de estos cambios pueden ser atribuidos a las modificaciones generadas en las propiedades del suelo y a su idoneidad como hábitat para la colonización microbiana (Gul et al., 2015; Jones et al., 2012; N. Xu et al., 2016) (Jones et al. 2012; Gul et al. 2015; Xu et al. 2016). En ese sentido, la estructura física y química del biochar ayuda a causar estas modificaciones (Steinbeiss et al., 2009).

Los hongos formadores de micorrizas son uno de los tipos de simbiosis más abundante de la biosfera. Las plantas colonizadas por micorrizas presentan una mayor tolerancia ante la sequía, las

altas temperaturas, los metales pesados, la salinidad y la acidez del suelo, e igualmente tienen una mayor habilidad para absorber nutrientes como el P, N, K, Ca y Mg, y agua, lo cual resulta en una mejor supervivencia bajo condiciones de estrés—biótico y abiótico— (Hassan et al., 2013; Solís-Domínguez et al., 2011); esto es debido a que las hifas de los hongos incrementan el área superficial disponibles para la absorción de nutrientes, y éstas a su vez pueden penetrar en pequeños poros del suelo donde las raíces no pueden hacerlo (Leung et al., 2013), permitiendo la colonización de suelos fuertemente intervenidos, donde su calidad biológica y estructural está fuertemente modificada (Honrubia García, 2009).

Los resultados clave de este estudio son aproximaciones exploratorias que permiten plantear que la perspectiva de estudio esté dirigida a evaluar en campo a corto y largo plazo, la influencia del biochar y las micorrizas sobre el microbioma rizosférico y las propiedades fisicoquímicas del suelo, considerando la magnitud de esta influencia con las tasa de aplicación de las enmiendas, las condiciones de producción y los factores edáficos del suelo objeto de rehabilitación, así como también es necesario considerar las posibles interacciones bióticas y abióticas, las características y propiedades particulares del tipo de suelo disturbado, y el tipo de acondicionamiento que se quiera establecer para rehabilitar este recurso tras una intervención antrópica. La aplicación de la enmienda de biochar y micorrizas se podría sugerir como una alternativa en el establecimiento de especies nativas como vegetación pionera en procesos de revegetalización y/o rehabilitación de suelos disturbados.

Como última reflexión, la explotación de la minería del carbón ocasiona una fuerte presión antrópica por la desertificación y la degradación de los suelos, lo que se destaca dentro de los temas que deben ser priorizados desde el punto de vista ambiental y del desarrollo económico y social en el área afectada. Es necesario tener en cuenta la problemática de la degradación de los

suelos en los procesos de planificación, por lo cual las medidas de desarrollo deben ser acordes a ello y a las necesidades de desarrollo de la región. Ante la alta perturbación de las zonas de los municipios influenciados por la actividad minera y con el fin de combatir los graves problemas sociales y ambientales ocasionados por los procesos de degradación de tierras y la desertificación, se considera indispensable tomar medidas “preventivas en el área que aún no han sido afectadas o que solo lo han sido levemente; aplicar medidas correctivas para mantener los procesos hidrológicos, ecológicos, la productividad y la diversidad biológica de las tierras desertificadas en grado moderado; y tomar medidas de rehabilitación y/o recuperación en las tierras gravemente afectadas por actividades de alto impacto como la explotación de minería de carbón. Así mismo, el uso de especies vegetales nativas, ha demostrado que son indispensables para dar inicio con los procesos de recuperación, ya que son éstas las principales iniciadoras de los procesos de mejoramiento en cuanto a la estructura, textura y dinámica microbiana de los suelos; impulsando así, procesos de sucesión ecológica en el área y otorgando a la comunidad afectada estabilidad ambiental y condiciones favorables para su desarrollo generacional.

5. Referencias

- Amonette, J., & Stephen, J. (2009). Characteristics of biochar: Microchemical properties (Book) | OSTI.GOV. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*, 2(1), 3-13. <https://www.osti.gov/biblio/985016>
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., & Sizmur, T. (2011, diciembre 1). A review of

- biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 159(12), 3269-3282. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.023>
- Bradshaw, A. D. (1987). The reclamation of derelict land and the ecology of ecosystems. En M. Gilpin & D. Aber (Eds.), *Applied population biology* (3.^a ed., Vol. 2). Kluwer; Monographiae Biologicae, 67. https://doi.org/10.1007/978-0-585-32911-6_2
- Caporaso, J. G., Kuczynski, J., Stombaugh, J., Bittinger, K., Bushman, F. D., Costello, E. K., Fierer, N., Peña, A. G., Goodrich, J. K., Gordon, J. I., Huttley, G. A., Kelley, S. T., Knights, D., Koenig, J. E., Ley, R. E., Lozupone, C. A., McDonald, D., Muegge, B. D., Pirrung, M., ... Knight, R. (2010). QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data. En National Library of Medicine (Ed.), *Nature Methods* (3.^a ed., Vol. 7, Número 5, pp. 335-336). *Nat Methods*. <https://doi.org/10.1038/nmeth.f.303>
- Díaz Muegue, L. C., Arranz González, J. C., & Peñuela Mesa, G. (2013). Caracterización físico-química y mineralógica de suelos en zona carbonífera del Cesar, Colombia - Dialnet. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 38(1), 42-47. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5428499>
- Edgar, R. C. (2010). Search and clustering orders of magnitude faster than BLAST. *Bioinformatics*, 26(19), 2460-2461. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq461>
- Fernández-Calviño, D., & Bååth, E. (2010). Growth response of the bacterial community to pH in soils differing in pH. *FEMS Microbiology Ecology*, 73(1), 149-156. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2010.00873.x>
- Gul, S., Whalen, J. K., Thomas, B. W., Sachdeva, V., & Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and

- future directions. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 206, 46-59. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.015>
- Haichar, F. E. Z., Marol, C., Berge, O., Rangel-Castro, J. I., Prosser, J. I., Balesdent, J., Heulin, T., & Achouak, W. (2008). Plant host habitat and root exudates shape soil bacterial community structure. *ISME Journal*, 2(12), 1221-1230. <https://doi.org/10.1038/ismej.2008.80>
- Hassan, S. E., Hijri, M., & St-Arnaud, M. (2013). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on trace metal uptake by sunflower plants grown on cadmium contaminated soil. *New Biotechnology*, 30(6), 780-787. <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2013.07.002>
- Holdridge, L., & Jiménez Saa, H. (1978). *Ecología basada en zonas de vida* (Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (ed.); 2.^a ed., Vol. 1). IICA. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/7936>
- Honrubia García, M. (2009). Las micorrizas: una relación planta-hongo que dura más de 400 millones de años - Dialnet. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 66(1), 133-144. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3117856>
- Jones, D. L., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T. H., & Murphy, D. V. (2012). Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry*, 45(1), 113-124. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.012>
- Joseph, S. D., Camps-Arbestain, M., Lin, Y., Munroe, P., Chia, C. H., Hook, J., Van Zwieten, L., Kimber, S., Cowie, A., Singh, B. P., Lehmann G, J., Foidl, N., Smernik, R. J., & Amonette, J. E. (2010). An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*, 48(1), 501-515. <https://doi.org/10.1071/SR10009>
- Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403-427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>

- Leung, H. M., Wang, Z. W., Ye, Z. H., Yung, K. L., Peng, X. L., & Cheung, K. C. (2013). Interactions between arbuscular mycorrhizae and plants in phytoremediation of metal-contaminated soils: A review. *Pedosphere*, 23(5), 549-563. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60049-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60049-1)
- Philippot, L., Raaijmakers, J. M., Lemanceau, P., & Van Der Putten, W. H. (2013). Going back to the roots: The microbial ecology of the rhizosphere. *Nature Reviews Microbiology*, 11(11), 789-799. <https://doi.org/10.1038/nrmicro3109>
- Rosales, J., Cuenca, G., Ramírez, N., & De Andrade, Z. (1997). Native colonizing species and degraded land restoration in La Gran Sabana, Venezuela. *Restoration Ecology*, 5(2), 147-155. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100X.1997.09717.x>
- Solís-Domínguez, F. A., Valentín-Vargas, A., Chorover, J., & Maier, R. M. (2011). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on plant biomass and the rhizosphere microbial community structure of mesquite grown in acidic lead/zinc mine tailings. *Science of the Total Environment*, 409(6), 1009-1016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.11.020>
- Steinbeiss, S., Gleixner, G., & Antonietti, M. (2009). Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(6), 1301-1310. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.03.016>
- Ussiri, D. A. N., Jacinthe, P. A., & Lal, R. (2014). Methods for determination of coal carbon in reclaimed minesoils: A review. *Geoderma*, 214-215, 155-167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.015>
- Xiao, W., Hu, Z., & Fu, Y. (2014). Zoning of land reclamation in coal mining area and new progresses for the past 10 years. *International Journal of Coal Science and Technology*, 1(2), 177-183. <https://doi.org/10.1007/s40789-014-0024-3>
- Xu, G., Lv, Y., Sun, J., Shao, H., & Wei, L. (2012). Recent Advances in Biochar Applications in Agricultural Soils: Benefits and

- Environmental Implications. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 40(10), 1093-1098. <https://doi.org/10.1002/clen.201100738>
- Xu, N., Tan, G., Wang, H., & Gai, X. (2016). Effect of biochar additions to soil on nitrogen leaching, microbial biomass and bacterial community structure. *European Journal of Soil Biology*, 74, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2016.02.004>
- Yao, Q., Liu, J., Yu, Z., Li, Y., Jin, J., Liu, X., & Wang, G. (2017). Changes of bacterial community compositions after three years of biochar application in a black soil of northeast China. *Applied Soil Ecology*, 113, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.01.007>
- Zhang, C., Liu, G., Xue, S., & Wang, G. (2016). Soil bacterial community dynamics reflect changes in plant community and soil properties during the secondary succession of abandoned farmland in the Loess Plateau. *Soil Biology and Biochemistry*, 97, 40-49. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.013>

Capítulo 4

Monitoreo del arbolado
urbano en el campus del
Tecnológico de Antioquia
(Medellín, Colombia)⁴

*Monitoring of urban trees in
The Technological Campus
of Antioquia
(Medellín, Colombia)*

⁴ Autores: Jiménez Rojas, Eliana M., Tamayo Restrepo, Isabel, Posada Mejía, Santiago, Serna González, Marcela, Universidad Nacional de Colombia sede Amazonia, Tecnológico de Antioquia – Institución Universitaria

RESUMEN

El arbolado urbano se considera como la red o sistema que comprende conjuntos de árboles o individuos aislados, ubicados en áreas urbanas o periurbanas. Esta vegetación urbana proporciona servicios ecosistémicos que mitigan los impactos de la urbanización, tales como mejorar la calidad del aire y la salud mental, contrarrestar el efecto de la isla de calor y reducir la escorrentía, entre otros. El objetivo del presente estudio fue establecer un programa de monitoreo a largo plazo del arbolado urbano del campus del Tecnológico de Antioquia (TdeA), localizado en la ciudad de Medellín (Colombia). Para esto, se inventariaron todos los individuos arbóreos con un diámetro igual o mayor a 10 cm; a los cuales se les midió el diámetro (a 1.3 m del suelo), altura total, parámetros de copa, coordenadas geoFiguras, afectaciones mecánicas, entre otros. Adicionalmente, se recopiló información secundaria sobre la permanencia de las hojas (perennifolia, semicaducifolia, caducifolia) y continente de origen. Se encontraron 377 tallos, correspondientes a 220 árboles de 50 especies, de las cuales 23 son nativas. El estudio se ha constituido como una línea base para el monitoreo de los árboles urbanos a largo plazo y, en una herramienta para su estudio, cuidado, manejo y conservación.

PALABRAS CLAVE

Arbolado urbano, mediciones arbóreas, muestro de arbolados urbanos, servicios ecosistémicos

ABSTRACT

The urban forest is considered the network or system that comprises groups of trees or isolated individuals located in urban or peri-urban areas. This urban vegetation provides ecosystem services that mitigate the impacts of urbanization, such as improving air quality and mental health, counteracting the heat island effect, and reducing runoff, among others. The objective of this study was to establish a long-term monitoring

program of the urban trees of the campus of the Tecnológico de Antioquia (TdeA), located in the city of Medellín (Colombia). Several parameters of all trees with a diameter equal to or greater than 10 cm (at 1.3 m from the ground) were assessed, such: diameter, total height, crown parameters, geographical coordinates, mechanical affectations, among others, were measured. Additionally, secondary information was collected on the permanence of the leaves (evergreen, semi-deciduous, deciduous) and geographical origin. Three hundred seventy-seven stems were found, corresponding to 220 trees of 50 species, of which 23 are native. The study has become a baseline for long-term monitoring of urban trees and a tool for their study, care, management, and conservation.

KEYWORDS

Urban forests, tree measurement, urban forest sampling

1. Introducción

Globalmente existe una tendencia e interés creciente de colegios y universidades que están exigiendo cada vez más la sostenibilidad y la protección ambiental en sus prácticas (Simon et al., 2020), lo cual está muy articulado con la necesidad apremiante de construir ciudades sostenibles en respuesta al alto crecimiento de las poblaciones urbanas en los últimos años a nivel mundial.

Dentro de este contexto, el arbolado urbano como ecosistema, cumple un papel fundamental en la oferta de diferentes tipos de servicios (culturales, de provisión, regulación, soporte y hábitat) que aumentan el bienestar de la población y la resiliencia de las ciudades, especialmente aquellos que mitigan los impactos de la urbanización (Bowler et al., 2010). Entre estos servicios, se pueden resaltar: el mejoramiento de la salud (South et al., 2018), el mejoramiento de la calidad del aire (del Pilar Arroyave-Maya et al., 2019; Escobedo et al., 2008), la reducción de la escorrentía superficial (Yao et al., 2015), la reducción de la radiación solar y la temperatura, la captura de carbono y la conservación de la biodiversidad (del Pilar Arroyave-Maya et al., 2019). Por lo tanto, los bosques urbanos considerados como la red o sistema que comprende grupos de árboles y/o individuos aislados ubicados en áreas urbanas y periurbanas (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2016), deben ser

inventariados y caracterizados en términos de su composición y estructura, así como la funcionalidad que expresan, vinculando en este análisis, su forma, conectividad, biotipo, especies de flora y fauna, avifauna y entomofauna asociados (Zouliá et al., 2009). En un mundo cada vez más urbanizado, los campus bien administrados pueden proporcionar hábitat e incluso refugio para especies de vida silvestre (Simon et al., 2020). Una manera de hacer frente a la expansión urbana es aumentando la cobertura arbórea e implementando programas de monitoreo del arbolado urbano que permitan una correcta plantación y manejo de los individuos arbóreos en las ciudades. En particular, Colombia cuenta con diversos estudios relacionados con el manejo del arbolado urbano, con énfasis en los diversos servicios ecosistémicos que estos brindan en diferentes ciudades del país (Arroyave-Maya et al., 2019; Huertas, 2017; Moreno & Hoyos, 2015). Sin embargo, la mayoría de estos estudios se concentra en inventarios o caracterizaciones con una única medición, que, si bien constituyen un punto de partida muy importante, evidencia vacíos en cuanto al monitoreo sistemático y riguroso a través de mediciones periódicas para así comprender la dinámica del arbolado urbano en Colombia.

El monitoreo de la vegetación garantiza datos periódicos que contribuyen a manejar y planificar adecuadamente las poblaciones arbóreas del país, en aspectos tan claves como la mitigación de factores de afectación que inciden en el deterioro progresivo de algunos individuos arbóreos (Restrepo., *et al*, 2015) y en la adecuada evaluación de la magnitud de los beneficios que estos brindan (Nowak et al., 2008). En este contexto, los campus universitarios representan un papel fundamental, no solo por su aporte de zonas verdes y árboles urbanos, sino por su potencial para realizar monitoreos permanentes de bosques urbanos que ofrezcan información útil para su gestión y manejo a largo plazo, sino también por el rol educativo y de sensibilización ambiental para la comunidad universitaria y público en general.

Por otro lado, la información disponible sobre mediciones constantes de árboles en la ciudad de Medellín (Colombia) sigue siendo escasa, lo cual dificulta la valoración de los servicios ecosistémicos que éstos prestan. En este contexto, el presente estudio, que parte de la existencia de una caracterización inicial realizada entre los años 2010-2012 de los árboles del campus del Tecnológico de Antioquia I. U. (TdeA) en Medellín (Amézquita, 2020; Serna-Gómez & García, 2017; Yepes et al., 2008), consiste en el establecimiento de un programa de monitoreo del bosque urbano a largo plazo, el cual en primer lugar realizó la actualización de la información existente y, estableció la línea base para el seguimiento del crecimiento arbóreo, la gestión y manejo del arbolado urbano de la institución. En esta publicación se presentan los métodos utilizados y los principales resultados encontrados en el estudio, así como las perspectivas de trabajo a futuro.

2. Metodología

2.2 Área de estudio

El estudio se realizó en la sede principal del Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria (TdeA), ubicada en Robledo, una de las comunas de la ciudad de Medellín (Colombia). Su área es de 37 845,97 m², que incluye 15 288,55m² de zonas verdes (Plan de emergencias - Tecnológico de Antioquia, 2010).

2.3 Métodos

En primer lugar, se revisaron el Plan de Manejo Arbóreo realizado en la institución (Serna-Gómez & García, 2017) y el Plan Paisajístico del TdeA (Vangelatos et al., 2012), para conocer la

identificación de las especies y el registro de datos dasométricos iniciales, tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), altura y diámetro de copa.

A partir de esta información preliminar, se realizó la marcación de árboles y palmas con troncos o tallos mayores de 10 cm de diámetro a 1.30 m desde el suelo, conocido como el diámetro a la altura del pecho (DAP en cm), mediante la asignación de un número consecutivo con pintura amarilla a base de aceite y con placas metálicas previamente numeradas, fijadas alrededor de los tallos con nylon. Una vez se marcaron todos los tallos con el tamaño propuesto (DAP > 10 cm), se procedió a tomar los siguientes datos y parámetros dasométricos:

2.4 Diversidad

La actualización de la diversidad e identificación de las especies se hizo con base en catálogos publicados, consulta a expertos y colecciones botánicas que fueron identificadas en el Jardín Botánico de Medellín.

2.5 Diámetro de altura al pecho (DAP en cm)

Mediante el uso de una cinta métrica se tomó la medida del DAP. En algunos casos especiales, se especificó un punto óptimo de medida diferente debido a la presencia de bifurcaciones, cicatrices, ondulaciones, y deformidades en el punto de medición del DAP.

2.6 Altura total (m)

La altura de los individuos arbóreos se halló mediante el uso de un clinómetro manual, para posteriormente estimar las alturas por principios trigonométricos.

2.7 Afectaciones mecánicas

Hace referencia a alguna condición del árbol ocasionada por agentes de daño mecánico como lo son guadañas, pintura, poda inadecuada, presencia de avisos instalados en los individuos y presencia de clavos.

Otros parámetros evaluados fueron: parámetros de copa, coordenadas geoFiguras; y se recopiló información secundaria sobre la permanencia de las hojas (perennifolia, semicaducifolia, caducifolia) y continente de origen.

3. Resultados

3.1 Composición florística del arbolado urbano del TdeA.

En el bosque urbano del TdeA, se encontraron de 220 individuos de hábito arbóreo (DAP>10 cm), de los cuales 193 son árboles y 27 son palmas. La diversidad del bosque urbano del TdeA está compuesta por 50 especies, de las cuales 27 (54%) son introducidas. Estas 50 especies corresponden a 23 familias botánicas. Las tres familias con más especies fueron: Fabaceae con diez especies, Arecaceae con nueve y Bignoniaceae con cuatro especies. Las familias restantes están representadas solo por una o dos especies. La especie arbórea más abundante en el bosque urbano del TdeA es el Urapán (*Fraxinus uhdei*), con 48 individuos, seguido por el Mango (*Mangifera indica*) con 29, Pero de Agua (*Syzigium malaccense*) con 13, Cheflera (*Schefflera actinophylla*) con 11 y Falso laurel (*Ficus benjamina*) con 9 individuos (Figura 1).

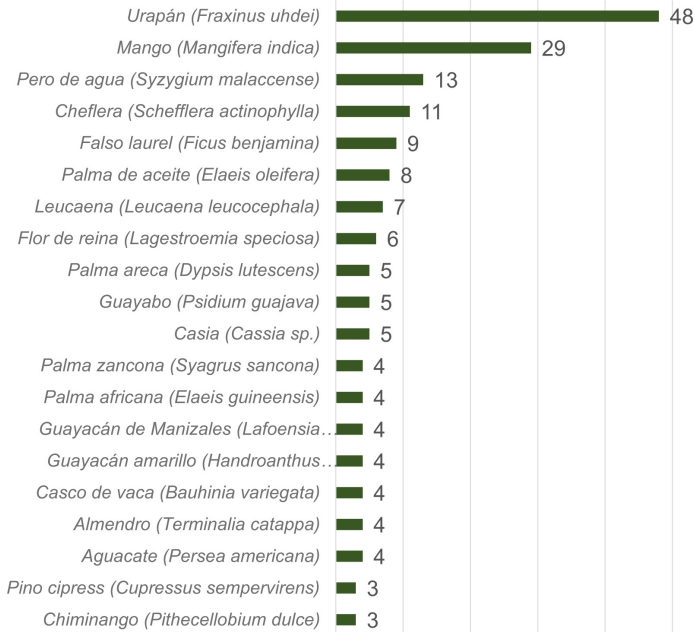


Figura 1. Especies más abundantes en el bosque urbano del TdeA.

Tabla 1. Especies más importantes con base en el IVIm:
Abundancia y Dominancia relativas

Nombre común	Especie	AR	DR	IVIm (%)
Urapán	<i>Fraxinus uhdei</i>	21,81	31,1293	26,47
Falso laurel	<i>Ficus benjamina</i>	4,09	28,8104	16,45
Mango	<i>Mangifera indica</i>	13,18	8,3858	10,78
Pero de agua	<i>Syzygium malaccense</i>	5,90	1,2383	3,57
Cheflera	<i>Schefflera actinophylla</i>	5	0,9991	2,99
Carmín	<i>Senna siamea</i>	2,27	2,9598	2,61
Palma de aceite	<i>Elaeis oleifera</i>	3,63	1,4911	2,56
Ceiba	<i>Ceiba pentandra</i>	0,90	3,8286	2,36
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>	3,18	0,8618	2,02
Chiminango	<i>Pithecellobium dulce</i>	1,36	2,3111	1,83

Flor de reina	<i>Lagestroemia speciosa</i>	2,72	0,8117	1,76
Piñon de oreja	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	0,90	2,2281	1,56
Casco de vaca	<i>Bauhinia variegata</i>	1,81	1,2026	1,51
Guayabo	<i>Psidium guajava</i>	2,27	0,5860	1,42
Ceiba verde	<i>Pseudobombax s eptenatum</i>	0,90	1,7667	1,33
Araucaria	<i>Araucaria heterophylla</i>	1,36	1,1293	1,24
Palma areca	<i>Dypsis lutescens</i>	2,27	0,1911	1,23
Palma africana	<i>Elaeis guineensis</i>	1,81	0,5724	1,19
Guayacán amarillo	<i>Handroanthus chrysanthus</i>	1,81	0,5521	1,18
Guayacán de Manizales	<i>Lafoensia acuminata</i>	1,81	0,5316	1,17

3.2 Estructura del arbolado urbano en el TdeA

Durante la medición de diámetros, se encontró que individuos de varias especies se encontraban ramificados antes de la altura de la medición (1.3 m) y, por lo tanto, se consideraron tallos independientes. Con base en esto, se encontró que, de los 220 individuos registrados, se midieron 377 tallos. El número de individuos y tallos para las especies más abundantes se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Especies con mayor número de tallos e individuos con DAP > 10 cm

No.	Nombre común	Especie	No. de individuos	No. de tallos
1	Urapán	<i>Fraxinus uhdei</i>	48	69
2	Mango	<i>Mangifera indica</i>	29	92
3	Pero de agua	<i>Syzygium malaccense</i>	13	16
4	Cheflera	<i>Schefflera actinophylla</i>	11	14
5	Falso laurel	<i>Ficus benjamina</i>	9	20
6	Palma de aceite	<i>Elaeis oleifera</i>	8	8

7	Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i>	7	15
8	Flor de reina	<i>Lagestroemia speciosa</i>	6	7
9	Casia	<i>Cassia sp.</i>	5	11
10	Guayabo	<i>Psidium guajava</i>	5	10
11	Palma areca	<i>Dyopsis lutescens</i>	5	5

Los datos del DAP del total de individuos arbóreos muestreados, oscilan entre 10,02 cm y 120,25 m, con un promedio de 42,28 m y una media de 18,39 cm, lo que indica que los fustes del arbolado del TdeA son medianos.

Por su parte, los individuos arbóreos que presentaron una mayor altura promedio pertenecen a la especie *Ficus benjamina* (Falso Laurel) con una altura total promedio de aproximadamente 17 m, luego le sigue *Elaeis guineensis* (Palma africana) con 16 m, *Araucaria heterophylla* (Aracauria) con 14 m, *Phoenix canariensis* (Palma fénix) y *Enterolobium cyclocarpum* (Piñon de Oreja) con 12 m.

4. Discusión

Se evidencia que la mayoría de las especies arbóreas presentes en el TdeA son introducidas, es decir, provienen de otras regiones del mundo. De hecho, las especies más abundantes en el campus del TdeA, coincide con las más abundantes en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Moreno & Hoyos, 2015). Este mismo comportamiento se evidencia en la mayoría de las ciudades latinoamericanas, las cuales presentan un exceso de especies introducidas. Este comportamiento responde a los orígenes de la arborización urbana en América, la cual tuvo una función cultural muy significativa debido a la introducción de especies provenientes de Europa, Asia y África

por parte de los europeos. La presencia de un gran número de especies introducidas puede conllevar a generar afectaciones en las infraestructuras urbanas e interferir en las relaciones ecosistémicas de las ciudades (Molina-Prieto & Acosta-Hernández, 2018). Por lo tanto, se resalta la importancia de considerar especies nativas en propuestas de arbolado urbano, ya que posiblemente se podrían adaptar al espacio urbano con mayor facilidad, posiblemente con menores dificultades de mantenimiento y más beneficios en cuanto a sus servicios ecosistémicos asociados.

Un resultado importante de este trabajo es evidenciar la presencia de especies con varios tallos. En bosques naturales, las plantas pueden producir múltiples tallos que crecen en varias direcciones, particularmente si el espacio físico no es limitado, para tener una mayor probabilidad de encontrar altos niveles de un recurso distribuido de manera desigual (Kroon & Hutchings, 1995), situación que puede darse también en el arbolado urbano ya que, si bien no hay mucha competencia por espacio físico, si hay escasez de recursos como agua y nutrientes, debido al tamaño reducido de las zonas verdes. Al parecer, los árboles de tallos múltiples reciben claros beneficios para la supervivencia e incluso crecimiento, en bosques naturales (Tanentzap et al., 2012) e incluso actúan para aumentar la persistencia de árboles individuales (Bond & Midgley, 2003), ventajas que también podrían encontrarse en bosques urbanos.

Este trabajo evidencia la importancia de la caracterización del arbolado urbano, principalmente en campus universitarios, pero principalmente del monitoreo, al proponer el marcado de árboles en zonas urbanas para garantizar así una toma de datos rigurosa y periódica, lo que posibilita el desarrollo de la investigación de los bosques urbanos a largo plazo. Además, es importante tener en cuenta la importancia de conservar las áreas verdes en los campus universitarios y cómo estos pueden proveer refugio a la fauna silvestre. De hecho, el TdeA cuenta

con un inventario preliminar sobre la avifauna, que evidencia la importancia de conservar el arbolado (Alonso & Vergara², 2017). El establecimiento de programas de monitoreo, permitirán el estudio de flora y su fauna asociada, así como de la estimación de los servicios ecosistémicos en tiempo real.

quedo atento a cualquier sugerencia. Los campus universitarios tienen un gran potencial para la toma, sistematización y análisis de datos permanente que permitirá comprender la dinámica del arbolado urbano y mejorar su cuidado y mantenimiento, con el apoyo de estudiantes y demás integrantes de la comunidad universitaria. Se destaca la importancia de establecer una comunicación asertiva y permanente con el personal de jardinería y mantenimiento para garantizar la gestión y manejo adecuado de los árboles y en general de todos los ciudadanos que están valorando cada vez más el componente arbóreo de la ciudad.

Este trabajo, así como otros autores lo recomiendan (Simon et al., 2020) resalta el potencial que tienen los campus universitarios en la conservación de especies de flora y fauna en los ecosistemas urbanos y la necesidad de que las instituciones de educación superior, las instituciones ambientales y territoriales trabajen mancomunadamente para dedicar mayores recursos para que los campus sean amigables con la fauna y la flora urbanas y aumenten las oportunidades para que los estudiantes sean los líderes de estos procesos y la población local así mismo pueda beneficiarse de estas zonas verdes dedicadas a la protección y al disfrute paisajístico.

5. Agradecimientos

La presente investigación se hizo gracias a la financiación de la Convocatoria de Investigación del Comité de Investigación del Tecnológico de Antioquia (CODEI)-Año 2018. Los autores agradecen al Profesor Juan Camilo Giraldo Mejía, coinvestigador del proyecto, a la coordinadora de servicios generales, Norela Rivera y de manera especial a todos los estudiantes del Semillero de Investigación Ecosistemas y Cambio Climático –EcoClima del TdeA, en particular a Salome Restrepo, Vladimir Mejía, Juan Esteban Arango, Andres Felipe Barreneche, Andrés Martínez, Alejandro Escudero, Jorge Vargas y a los estudiantes del Grupos de Ecología y Botánica del TdeA de 2018-2 y 2019-1.

6. Referencias

- Alonso, D., & Vergara, R. (2017). Inventario de aves en el campus del Tecnológico de Antioquia sede Robledo Medellín. *Inventory of birds in the campus of Tecnológico de Antioquia headquarters Robledo Medellín*. En *Cuaderno Activa N°9* (Vol. 9). <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/420>
- Amézquita, A. (2020). *Censo del arbolado urbano ubicado en el Cantón norte del Ejército Nacional de Colombia en la ciudad de Bogotá D.C.* <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/25386>
- Arroyave-Maya, M., Posada-Posada, M. I., Nowak, D. J., & Hoehn, R. E. (2019). Air pollution removal by the urban forest in the Aburra Valley. *Colombia Forestal*, 22(1), 5-16. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13695>

- Bond, W. J., & Midgley, J. J. (2003). The evolutionary ecology of sprouting in woody plants. *International Journal of Plant Sciences*, 164(3), 21-36. <https://doi.org/10.1086/374191>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Plan de emergencias - Tecnológico de Antioquia, Pub. L. No. 1, PLAN DE EMERGENCIAS PREVENCIÓN, ATENCIÓN, RECUPERACIÓN Y RESPUESTA 16 (2010). <https://studylib.es/doc/6223506/plan-de-emergencias---tecnológico-de-antioquia>
- del Pilar Arroyave-Maya, M., Posada-Posada, M. I., Nowak, D. J., & Hoehn, R. E. (2019). Air pollution removal by the urban forest in the Aburra Valley. *Colombia Forestal*, 22(1), 5-16. <https://doi.org/10.14483/2256201X.13695>
- Escobedo, F. J., Wagner, J. E., Nowak, D. J., De la Maza, C. L., Rodriguez, M., & Crane, D. E. (2008). Analyzing the cost effectiveness of Santiago, Chile's policy of using urban forests to improve air quality. *Journal of Environmental Management*, 86(1), 148-157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.029>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). Guidelines on urban and peri-urban forestry. En F. Salbitano, S. Borelli, M. Conigliaro, & C. Yujuan (Eds.), *Guidelines on urban and peri-urban forestry* (pp. 72-96). FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. <http://www.fao.org/3/i6210e/i6210e.pdf>
- Forestal, C., El Valle De Aburrá, U. E., Iván Restrepo, H. O., Moreno, F. H., & Helena Hoyos, C. E. (s. f.). *INCIDENCIA DEL DETERIORO PROGRESIVO DEL ARBOLADO Incidence of progressive deterioration of urban trees in the Aburrá valley, Colombia*. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2015.2.a04>

- Huertas, A. (2017). *Caracterización, diagnóstico y manejo del arbolado urbano y zonas verdes de las instalaciones de la Escuela de Impuestos y Aduanas Nacionales DIAN*. <http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/6541>
- Kroon, H. de, & Hutchings, M. J. (1995). Morphological plasticity in clonal plants: the foraging concept reconsidered. *Journal of Ecology (Oxford) (United Kingdom)*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=GB9519969>
- Molina-Prieto, L. F., & Acosta-Hernández, C. F. (2018). Orígenes y evolución de las arborizaciones urbanas en América Latina con énfasis en Bogotá y Medellín. Formas urbanas colonial, republicana y protomoderna. *Gestión y Ambiente*, 21(2), 276-290. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n2.74906>
- Moreno, F., & Hoyos, C. (2015). *Guía para el manejo del arbolado urbano en el Valle de Aburrá*. Medellín (N.º 1; 2). <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Zonasverdes/GuiaparaelmanejodelarboladourbanoenelValledeAburraNuevo.pdf>
- Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C., Hoehn, R. E., Walton, J. T., & Bond, J. (2008). A Ground-Based Method of Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services. En *Arboriculture & Urban Forestry*. 34(6): 347-358. (Vol. 34, Número 6).
- Serna-Gómez, H., & García, A. (2017). *Plan Estratégico Manejo de Arbolado*.
- Simon, I., Che, J., & Baker, L. R. (2020). University campuses can contribute to wildlife conservation in urbanizing regions: A case study from Nigeria. *Journal of Threatened Taxa*, 12(13), 16736-16741. <https://doi.org/10.11609/jott.6316.12.13.16736-16741>
- South, E. C., Hohl, B. C., Kondo, M. C., MacDonald, J. M., & Branas, C. C. (2018). Effect of Greening Vacant Land on Mental Health of Community-Dwelling Adults: A Cluster Randomized Trial. *JAMA network open*, 1(3), e180298. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2018.0298>

- Tanentzap, A. J., Mountford, E. P., Cooke, A. S., & Coomes, D. A. (2012). The more stems the merrier: advantages of multi-stemmed architecture for the demography of understorey trees in a temperate broadleaf woodland. *Journal of Ecology*, *100*(1), 171-183. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01879.x>
- Vangelatos, E., Serna, M., & Montoya, J. (2012). *Plan Paisajístico. Medellín, Colombia: Tecnológico de Antioquia Institución Universitaria*. Tecnológico de Antioquia. <https://dspace.tdea.edu.co/handle/tda/472>
- Yao, L., Chen, L., Wei, W., & Sun, R. (2015). Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis. *Urban Forestry and Urban Greening*, *14*(2), 300-308. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.02.014>
- Yepes, S. M., Naranjo, L. J. M., & Sánchez, F. O. (2008). Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del valle del aburrá, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, *61*(1), 4422-4431. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/refame/article/view/24742>
- Zoulia, I., Santamouris, M., & Dimoudi, A. (2009). Monitoring the effect of urban green areas on the heat island in Athens. *Environmental Monitoring and Assessment*, *156*(1-4), 275-292. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0483-3>

Capítulo 5

Las celdas de combustible
microbiano como estrategia
para el desarrollo sostenible⁵

*Microbial fuel cells as a
strategy for sustainable
development*

⁵ Autores: Silva Cuevas, Helmer Francisco, Peña García, Julián Armando, Lina Patricia Vega, Alejandra Castro Ortegón, Pedro Mauricio Acosta Castellanos. Universidad Santo Tomás. Seccional Tunja. Colombia

RESUMEN

Las celdas de combustible microbiano son una alternativa tecnológica que busca entre otros contribuir a la disminución de la pobreza mediante el acceso de las comunidades rurales a los recursos naturales, para generar energía asequible y no contaminante de manera renovable, fomentar la innovación y contribuir en la acción por el clima por medio de soluciones sostenibles. En la presente investigación se diseñó un prototipo a escala laboratorio de una celda combustible bacteriana, para tratar el agua residual de una vivienda rural tipo del Departamento de Boyacá, Colombia, para generar energía y gas metano. Se realizó la caracterización físico-química del agua residual antes y después del proceso de tratamiento, y se modificaron las variables de proceso para aumentar la eficiencia de la celda. En el desarrollo de las fases experimentales la generación máxima de voltaje fue de 379,5 mV, con una reducción máxima de la DBO del 89,8% para el Cátodo y de 65,1% para el Ánodo. Se concluyó que la combinación óptima de sustratos sucedió al agregar heces bovinas a las aguas residuales domésticas, y se determinó la configuración óptima del prototipo. Este tipo de tecnologías puede contribuir al mejoramiento de la calidad de vida de las comunidades rurales.

Palabras claves

Celda de combustible microbiano, tratamiento de aguas residuales domésticas, Demanda Biológica de Oxígeno, energías alternativas.

ABSTRACT

Microbial fuel cells are a technological alternative that seeks, among others, to contribute to the reduction of poverty through the access of rural communities to natural resources, to generate affordable and non-polluting energy in a renewable way, promote innovation and contribute to the climate action through sustainable solutions. In the present investigation, a

laboratory-scale prototype of a bacterial fuel cell was designed to treat wastewater from a typical rural house in the Department of Boyacá, Colombia, to generate energy and methane gas. The physical-chemical characterization of the wastewater was carried out before and after the treatment process, and the process variables were modified to increase the efficiency of the cell. During the development of the experimental phases, the maximum voltage generation was 379.5 mV, with a maximum BOD reduction of 89.8% for the Cathode and 65.1% for the Anode. It was concluded that the optimal combination of substrates occurred when adding bovine feces to domestic wastewater, and the optimal configuration of the prototype was determined. This type of technology can contribute to the improvement of the quality of life of rural communities.

Keywords

Microbial Fuel Cell, Domestic Wastewater Treatment, Biological Oxygen Demand. Alternative energy.

1. Introducción

1.1 Celda de Combustible Microbiana (CCM)

Es un dispositivo bio-electroquímico que utiliza aguas residuales como sustrato para la generación de energía a partir de la energía química almacenada en los enlaces químicos de la materia orgánica e inorgánica, por medio de los procesos de óxido-reducción y las reacciones catalíticas de las bacterias presentes en ella. Al mismo tiempo, reduce los niveles de contaminación mediante remediación biológica, ya que genera la descomposición de los compuestos orgánicos debido a la acción de las comunidades bacterianas (D. Revelo et al., 2013).

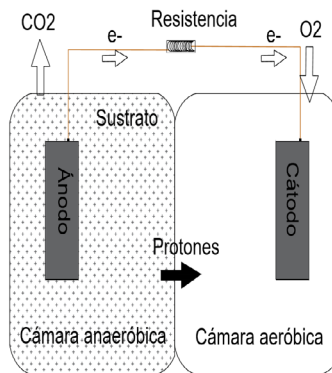


Figura 1. Celda de combustible microbiana

Fuente: (Pineda & Rosas, 2016)

Dentro de la celda de combustible microbiano se generan diversas reacciones químicas, las cuales tienen un papel fundamental en el proceso de generación de energía. Estas reacciones son de óxido-reducción: en la cámara anódica, se produce la oxidación del hidrógeno, la cual produce electrones y protones. Los protones son transportados desde el ánodo hacia el cátodo por medio de la membrana, mientras que los electrones generados son transportados por los electrodos mediante un circuito externo hacia el cátodo. En la cámara catódica se produce la reducción del oxígeno debido a la reacción entre el elemento y los protones y electrones presentes, formando agua y produciendo calor (Pineda & Rosas, 2016).

1.2 Ventajas

Las CCM presentan diversas ventajas en comparación a otras tecnologías implementadas en la generación de energía a partir de materia orgánica (Alzate-Gaviria et al., 2008), dentro de las cuales se encuentran:

- Convierten directamente los sustratos a electricidad
- Operan de forma eficiente a temperatura ambiente
- No requieren del tratamiento del biogás generado en la celda
- No requieren necesariamente de energía extra para airear el cátodo
- Tienen aplicaciones potenciales específicamente en lugares alejados con ausencia de infraestructura eléctrica, convirtiéndola en una excelente opción de energía renovable.
- Trabajan de manera continua y discontinua
- Son de bajo costo
- Previenen la difusión de oxígeno en la cámara anódica
- Su diseño permite que se adopten diversas formas prácticas para su funcionamiento
- No necesita de una membrana PEM (Nafion, ultrex), lo que la vuelve menos costosa

1.3 Problemática

Los países ubicados en el trópico como es el caso de Colombia se caracterizan por tener un clima idóneo que permite el desarrollo de actividades agropecuarias. El Departamento de Boyacá ha potenciado la economía de las diferentes ciudades y municipios basado en la producción agrícola y pecuaria. Estas actividades han contribuido en gran parte a la generación de grandes cantidades de residuos de origen rural y al aumento de problemas ambientales a los recursos como el agua, el aire y el suelo.

En la actualidad la falta de servicios de alcantarillado en las zonas rurales, ha generado la búsqueda de alternativas que permitan tratar las aguas residuales como los tanques sépticos. Sin embargo, según el Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental realizado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el año 2012, los tanques sépticos son insuficientes para reducir las cargas contaminantes y por ello es fundamental complementar esta tecnología mediante un sistema de tratamiento como las CCM que ayuden a la reducción de los niveles de contaminación de las aguas residuales domésticas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013).

De acuerdo a lo anterior, las CCM surgen como una alternativa viable y sostenible para el tratamiento del agua residual en estas áreas vulnerables y al mismo tiempo abarcan varios ODS a fin de mitigar los problemas ambientales y mejorar la calidad de vida de las personas en dichas zonas mediante la generación de energía y biogás para el cubrimiento de las necesidades básicas. Sin embargo, este tipo de tecnología a escala real aún se encuentra en fase de exploración. Por lo que su desarrollo actualmente se realiza a escala de laboratorio, estudiando desde diferentes puntos vista la generación de gas metano y de energía; así como la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales domésticas e industriales.

1.4 Aplicaciones

Estos estudios muestran la viabilidad de las Celdas de Combustible Microbiano para generar energía y degradar los contaminantes en aguas residuales y residuos domésticos. De manera que, en base a ellos y la experimentación expuesta, se busca adaptar estos modelos a una vivienda rural promedio en Colombia y mejorar sus condiciones, así mismo seguir desarrollando alternativas de producción de energía con base en la utilización de cualquier tipo de residuo, esto con el fin de mejorar las condiciones de las fuentes hídricas contaminadas con vertimientos.

Los siguientes estudios son:

- La NASA necesitaba una forma de manejar los residuos generados durante los vuelos espaciales, por ello se interesó en la implementación de las celdas de combustible microbiano, para obtener energía eléctrica mediante el almacenamiento de los residuos y los microorganismos presentes en ellos (NASA, 1967).
- La membrana de intercambio aniónico (AEM) en la celda de combustible microbiana obtuvo una eliminación mayor de DQO y nitrato, pero generó una menor cantidad de energía, a comparación de la celda con membrana de intercambio catiónico (CEM), que produjo mayor energía, pero tuvo una eliminación de DQO y nitratos en menor cantidad ((Lee et al., 2019)).
- En 1973, S. Suzuki desarrolló un prototipo de celda de combustible que utilizaba ambientes propicios para el desarrollo de bacterias anaerobias; modelo que tuvo una gran acogida ya que se obtenían buenos resultados en producción de energía y en la disminución de la DQO, (Ríos Lara, 2016).
- Ragab, Elawad y Abdel-Halim, realizaron en el 2019 varias pruebas con diferentes concentraciones de sustratos con ciclos cortos en su tiempo de retención,

las concentraciones de DBO de 100 mg/L, 150 mg/L y 300 mg/L y obtuvieron resultados de eliminación de DBO del 90%, 92% y 53% respectivamente, así como una generación de potencia máxima de 824 mv, 858 mv y 808 mv.

- Las aguas residuales generadas por la población, pueden utilizarse como sustrato para las celdas de combustible microbiano en plantas de tratamiento de aguas residuales de municipios o ciudades, reduciendo la concentración de contaminantes y a su vez generando varios tipos de combustibles como metano e hidrógeno y energía eléctrica (Wei et al., 2014).
- Estudios que permiten inferir que las celdas microbianas podrían aumentar significativamente la eficiencia de producción de energía y ser más factible de implementar.
- (Pannell et al., 2016) analizaron el rendimiento en la producción de energía teniendo en cuenta la forma como se suministra el sustrato en la celda, es decir, si se suministra de forma continua o por lotes, dando como resultado que una entrega de sustrato por lotes aumenta la producción de energía dentro del sistema, ya que permite un aumento en la concentración de las bacterias presentes. De igual manera, la operación por lotes permite una mayor acción metabólica de las bacterias logrando eliminar 88% de carbohidratos, 76% de proteínas y un 8% de nitrógeno (Lee et al., 2019).

2. Metodología

Se utilizó como base para el desarrollo del presente trabajo, una revisión bibliográfica narrativa, en la cual, se aborda el funcionamiento de las celdas, los parámetros a analizar y

las condiciones apropiadas para obtener su máxima eficiencia, de igual manera, se identifican los materiales a utilizar teniendo en cuenta su accesibilidad.

2.1 Selección del diseño del tipo celda microbiano a escala laboratorio

Para el desarrollo de Celda de combustible microbiano se utilizó el diseño típico de una celda de doble cámara, el cual es óptimo para tratar la cantidad de residuos generados en las zonas rurales, debido a que tiene una mayor capacidad del sistema. De igual manera se reduce el contenido de cargas orgánicas, ya que se genera la separación de las aguas residuales de la vivienda en aguas negras y aguas grises, generados durante las actividades cotidianas. A continuación, se puede observar en la figura 1 el diseño de doble cámara que se va a implementar en el desarrollo de la investigación.

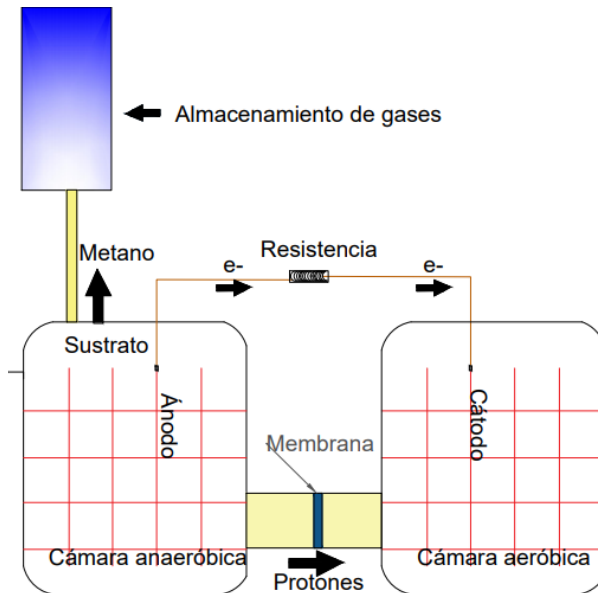


Figura 1. Prototipo de celda de combustible microbiana de doble cámara
Fuente: Diseño adaptado por los autores.

2.2 Selección del tipo de material

Es importante seleccionar materiales económicos, sustentables y accesibles para la construcción de la celda de combustible microbiano, igualmente, para que sea una tecnología viable de múltiples aplicaciones, la implementación de materiales de alto costo no genera que este diseño sea accesible para las comunidades rurales.

Para seleccionar el material de las cámaras de almacenamiento se determinó mediante sus propiedades térmicas y eléctricas, ya que según lo reportado por la referencias los materiales implementados deben tener una baja conductividad eléctrica para evitar el paso a los electrones a través del material hacia el exterior, y conserve la temperatura mediante una baja conductividad térmica en condiciones normales (Vázquez & Marjorie, 2018).

Es por ello que compararon varios materiales con estas propiedades, como se evidencia en la tabla 1.

Materiales	Propiedades eléctricas	Propiedades térmicas	
	Conductividad (S/m)	Temperatura Máxima De Utilización (°C)	Conductividad Térmica a (25°C) (W/m °K)
Vidrio	$(10^{-11} - 10^{15})^{115}$	(500) ¹¹⁹	$(0.6 - 1)^{120}$
Policarbonato	-	$(115 - 120)^{121}$	$(0.19 - 0.22)^{122}$
Plexiglás	-	$(50 - 90)^{123}$	$(0.17 - 0.19)^{124}$
Plásticos	-	115 – 170	0.15 - 0.4

Tabla 1. Propiedades eléctricas y térmicas de los materiales para las cámaras de las celdas de combustible microbianas

Fuente: (Vázquez & Marjorie, 2018)

2.2.1 Membrana de intercambio protónico

Para la selección de la membrana se tuvo en cuenta la respectiva clasificación de acuerdo a criterios de transporte, estructura y durabilidad que lleve a cabo el material seleccionado:

- Según el transporte: Presenta un transporte de intercambio iónico, la cual tiene una subclasificación de intercambio catiónico o aniónico.
- Según su estructura: Tienen una estructura microscópica, en la cual se subclasifican de acuerdo a la porosidad como densas, debido a que son más resistentes en comparación al caucho natural y al tipo de configuración, el cual es simétrico.
- Según su durabilidad: Al ser un material sintético formado de manera compuesta por la mezcla de polímeros, este material soporta la degradación a diversas condiciones.

Por lo general, las membranas que se implementan en este tipo de tecnologías suelen ser poliméricas, pero en la mayoría de las ocasiones la elección de los materiales se limita exclusivamente a criterios de accesibilidad, para el presente caso se utilizaron los guantes de nitrilo (Acrilonitrilo Butadieno) (Vázquez & Marjorie, 2018).

2.2.2 Electrodo: Malla de alambre galvanizado

Los electrodos son los que permiten llevar a cabo el transporte de los electrones del cátodo hacia el ánodo. Una variable fundamental a tener en cuenta es la conductividad, ya que determina la capacidad que tienen los electrodos para transferir el paso de corriente. Así pues, diversas investigaciones han estudiado los materiales convencionales entre ellos el carbono (varilla de grafito, cepillo de fibra de carbono, tela de carbono y fieltro de carbono) y materiales metálicos como la malla de

alambre galvanizado, ya que tiene propiedades eléctricas ideales (Vázquez & Marjorie, 2018), como se evidencia en la tabla 2.

Materiales	Propiedades Eléctricas
	Conductividad (S/m)
Carbón - amorfo	$1.25 - 2 \times 10^3$
Carbón - grafito	$2 - 3 \times 10^5$
Malla de alambre galvanizado	1.45×10^6

Tabla 2. Propiedades eléctricas de los materiales carbonosos y metálicos
Fuente:(Vázquez & Marjorie, 2018)

2.2.3 Circuito externo: Alambre de cobre calibre 16

El alambre de cobre tiene la capacidad de conducir corriente dependiendo de su calibre, el calibre 16 es un alambre de cobre que maneja bajas cantidades de corriente y voltaje, además las CCM durante su funcionamiento generan voltaje y corriente en cantidades bajas para los prototipos de laboratorio (Pineda & Rosas, 2016).

2.2.4 Sistema de almacenamiento de gases

Se pueden utilizar diversos métodos para almacenamiento y medición del gas generado, el método por volumen desplazado facilitaba la cuantificación de gas en periodos cortos de tiempo, ya que se realizaban las lecturas por medio de una probeta aforada, desarrollando el monitoreo continuo y la toma de datos de forma práctica.

2.3 Selección del tipo de residuos de la zona rural

Con respecto al funcionamiento de la celda de combustible microbiano es importante seleccionar el tipo de residuo que se

implementara en la puesta en marcha de las CCMs. Para este caso en particular se eligieron los siguientes sustratos:

- **Agua residual doméstica:** El origen de estas aguas son de la vivienda rural, las cuales se recolectaron en una caja de inspección antes de llegar al pozo séptico.
- **Heces Bovinas:** Se seleccionó este tipo de residuo, debido a que, la actividad ganadera se encuentra distribuida en la zona rural, este residuo contiene gran variedad de microorganismos resaltando la *Escherichia Coli* la cual es fundamental para la generación de energía y biogás.
- **Compostaje:** Estos residuos orgánicos son generados con frecuencia en las viviendas, además, cuenta con altos niveles de nitrógeno y materia orgánica, los cuales son ideales para el funcionamiento de la celda. Igualmente, tienen diversos microorganismos, entre los que se resalta el género *Geobacter* por su capacidad para oxidar compuestos orgánicos y liberar electrones.

2.4 Diseño Experimental

Se desarrolló una metodología experimental cuantitativa, la cual permite el análisis de variables dependientes con respecto a las mediciones de variables independientes, con la finalidad de observar el comportamiento de la celda mediante la fluctuación de las variables dependientes, de igual manera se realizó la comparación de los parámetros físico-químicos de la materia orgánica antes y después de ser utilizada en la CCM, a estos datos se los denomino pre-test y pos-test, como se puede observar en la Figura 2, cada celda debe contener un volumen que satisfaga el tiempo de retención del sustrato dentro de cada cámara.

La comparación entre los valores pre-test y pos-test de estos parámetros permite obtener un análisis del comportamiento con respecto a las variables en la celda desarrollada (Morillón-gálvez, 2016).

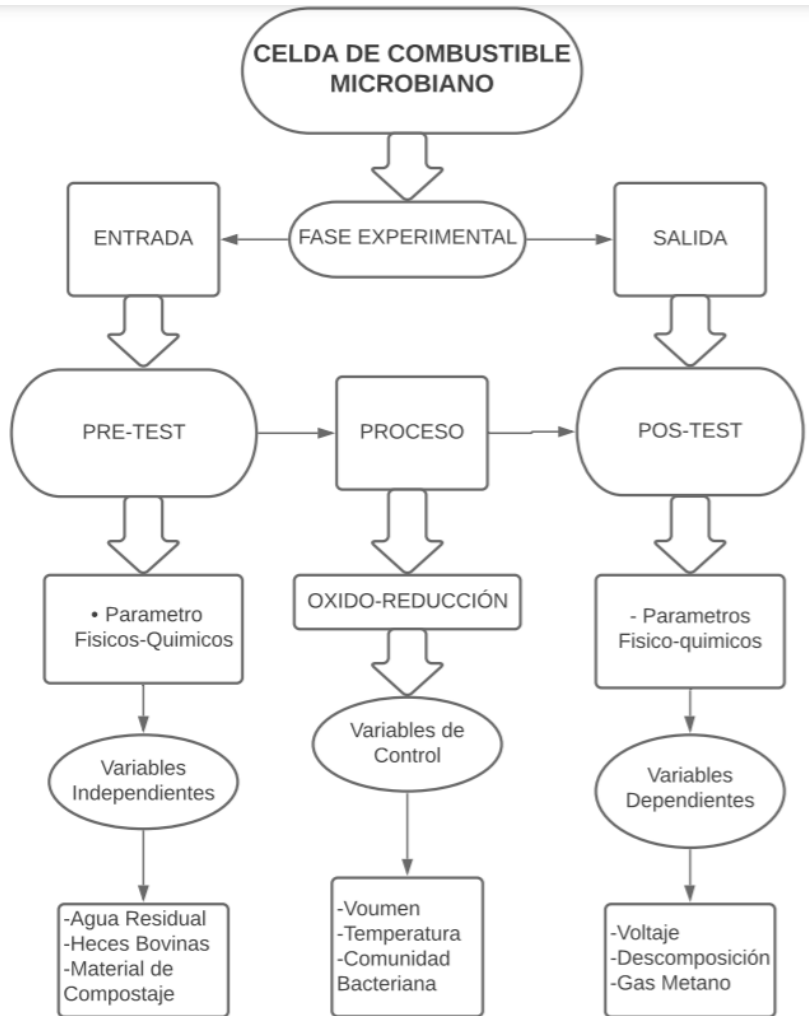


Figura 2. Desarrollo experimental.
Fuente: Diseño elaborado por los autores.

3. Análisis y resultados

3.1 Caracterización fisicoquímica de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales domésticas generadas por las viviendas rurales presentan algunos parámetros que se compararon con la resolución 631 del 2015, en esta comparación se presentan el cumplimiento de la mayoría de los parámetros e incumplimientos de unos pocos, según la tabla 3, la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales pre-test, el valor de la Demanda Química de Oxígeno (DQO), se obtuvieron valores superiores a 1500 mg/L, debido a que superó el rango medio de medición, esta variable supera el límite permisible y se identifica como una variable primordial en la evaluación del sistema de tratamiento para cumplir con lo establecido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Parámetros	Aguas residuales domésticas	Aguas grises de cocina	Aguas grises de baño (ducha)
pH	8,41	9,25	6,5
T °C	21,2	33,8	29,2
%OD	37,8	40,5	36,9
ORP	147,2	60,5	235
Conductividad ($\mu\text{S} / \text{cm}$)	1774	318	290
Sólidos Sedimentables (mg/L)	0,5	0,7	0,3

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica las aguas residuales domésticas

Fuente: Elaborada por los autores.

3.2 Desarrollo experimental

3.2.1 Generación de Voltaje

Se realizó un experimento con un tiempo de retención de 10 días, implementado aguas grises en la cámara catódica y en la cámara anódica aguas residuales domésticas, material de compostaje y heces bovinas. Donde se obtuvieron los resultados de voltaje en la figura 3.

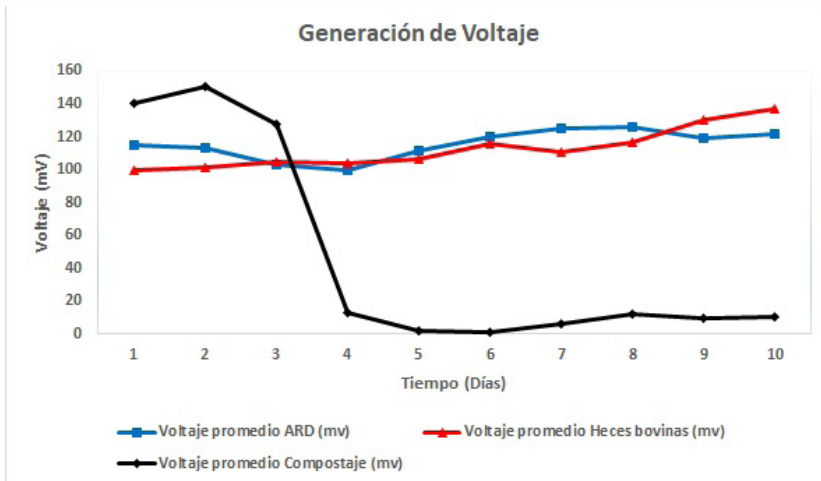


Figura 3. Voltajes generados por la Celda de Combustible Microbiano

El comportamiento que se observa en la figura 3, se debe a los sustratos que presentan un nivel de degradación avanzado por medio de la digestión, presentan un mejor comportamiento en cuanto a la generación de energía con respecto al material de compostaje, debido a que cuentan con una comunidad bacteriana establecida al llegar a la CCM, lo cual facilita la aclimatación y la pronta respuesta por parte de estos sustratos.

3.2.2 Densidad de potencia

El desempeño de las CCM se analizó de acuerdo a las mediciones de voltaje en un periodo de tiempo, mediante el parámetro de

densidad de potencia, el cual permite evaluar el comportamiento de este tipo de tecnologías.

En la figura 3, se puede observar el comportamiento de las densidades de potencia que se obtuvo en la celda implementado un área de electrodo de 0.01419 m², durante el tiempo de operación de 10 días. Se utilizó diferentes sustratos en el sistema, y la mejor eficiencia se obtuvo en la CCM con heces bovinas, el valor máximo obtenido fue de 0.95 (mW/m²) al 10 día de operación con un voltaje de 139,9 mV.

Esto se da a través de la cantidad de materia orgánica presente los sustratos y de igual modo se relacionada con las reacciones que ocurren de óxido – reducción en las superficies del electrodo. De igual manera este valor de densidad de potencia obtenido se encuentra entre los valores de 0.1 MW/m² a 4.3 MW/m² reportados por la literatura, debido a que en los último 10 años se han logrado avances que han permitido incrementar en diferentes órdenes de magnitud este parámetro con respecto a las CCMs (D. M. Revelo et al., 2013).

Se realizó la muestra del cálculo con respecto al parámetro de densidad de potencia en la producción de energía relacionado a la CCM, se determinó un área de electrodos de 0.01419 m².

Potencia (P)

$$P = V * I$$

$$P = (139.9 \text{ mv}) * (0.000096 \text{ mA}) = 0.00134 \text{ MW}$$

Densidad de potencia (DP)

$$P = P/a$$

$$DP = \frac{(0.00134 \text{ MW})}{(0.01419 \text{ m}^2)} = 0.95 \text{ mW/m}^2$$

3.2.3 Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

Para determinar el porcentaje de tratamiento de las aguas residuales a través del DBO₅, se seleccionó una muestra pre-test y pos-test de la CCM, la toma de datos DBO₅ se realizó por medio del sistema de medición DBO DB 600 dando los siguientes resultados:

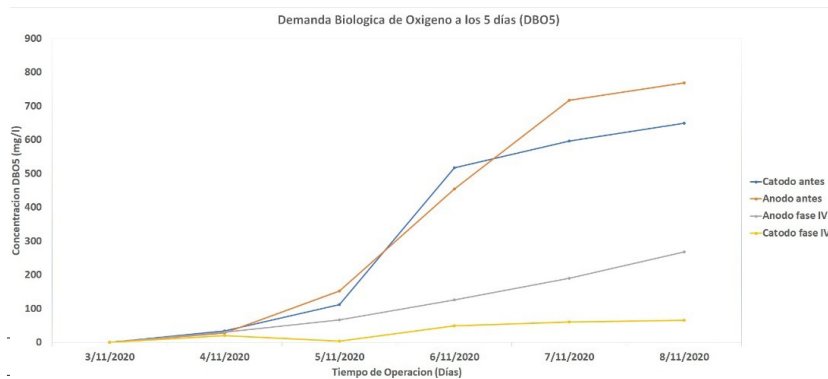


Figura 4. Comparación del DBO₅ en la cámara catódica y anódica antes y después del tratamiento en la fase IV

Según la figura 4, se evidencia que el DBO₅ obtenido del sustrato antes de haber pasado por el proceso de tratamiento de CCM, en la cámara catódica fue de 650 mg/l y en la cámara anódica de 769 mg/l, se determinó un alto grado de contaminación, ya que el sustrato contiene gran cantidad de compuestos degradables, por ende, los microorganismos requirieron de una mayor cantidad de oxígeno para descomponer la materia orgánica por medio de la oxidación bioquímica (Aguirre Ossa, 2018).

3.2.4 Porcentaje de remoción del DBO₅

Al obtener los datos de DBO₅ tanto del inicio y del final de proceso se procedió a el porcentaje de remoción teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$\text{Remocion} = \frac{\text{DBO (Inicio del proceso)} - \text{DBO (Final del proceso)}}{\text{DBO (Inicio del proceso)}}$$

$$\% \text{Remocion} = R * 100$$

$$\text{Remoción Cátodo} = \frac{650 - 66}{650} = 0.898$$

$$\% \text{Remocion Cátodo} = 0.552 \times 100 = \mathbf{89.8\%}$$

$$\text{Remoción Ánodo} = \frac{769 - 268}{769} = 0.651$$

$$\% \text{Remocion Ánodo} = 0.552 \times 100 = \mathbf{65.1\%}$$

Ecuación 9. Remoción DBO5 Cátodo - Ánodo

Los valores de DBO₅ después del tratamiento mediante la CCM, donde el cátodo tuvo 66 mg/l y el ánodo 268 mg/l, dando a entender que la cantidad de compuestos orgánicos biodegradables presentes en el agua residual de las dos cámaras se redujeron durante el tiempo de operación de 10 días, generando así un porcentaje de descontaminación del 89,9% en el cátodo y de 65.1% para el ánodo en comparación con el DBO₅ de las muestras iniciales sin tratamiento.

3.3 Generación de gas metano

3.3.1 Potencial y eficiencia en la generación de gas metano

El potencial de los sustratos utilizados para generar gas metano, está directamente relacionado a la cantidad de sólidos, ya que, según el IPCC las heces de los bovinos tienen un 20% de sólidos volátiles en el total de sus excrementos, además que cada kilogramo de sólidos volátiles tiene la capacidad de producir 0,1 kg de CH₄ (Carlin et al., 2015).

Teniendo en cuenta lo anterior, se relaciona la cantidad de heces utilizadas dentro de los montajes para determinar el potencial en la generación de gas metano, en la fase IV la CCM utilizó 173,3 gr de heces bovinas, con un estimado de sólidos volátiles de 34,66 g. Al realizar la conversión de sólidos volátiles a kg de CH_4 , se obtiene que 34,66 g de heces bovinas pueden generar 3,466 g de CH_4 ; El volumen del gas se obtiene mediante la densidad del gas metano en condiciones de temperatura de 0 a 10 °C y a 1 atm de presión determinada por (Valencia-Zuluaga et al., 2017) con un valor de 0,717 Kg/m³. Teniendo en cuenta lo anterior se determinó que 3,466 gr de gas metano ocupa un volumen de 4825 ml, de los cuales la CCM género dentro de su tiempo de operación un volumen de biogás de 221ml, con un comportamiento ascendente como observa en la Figura 5.

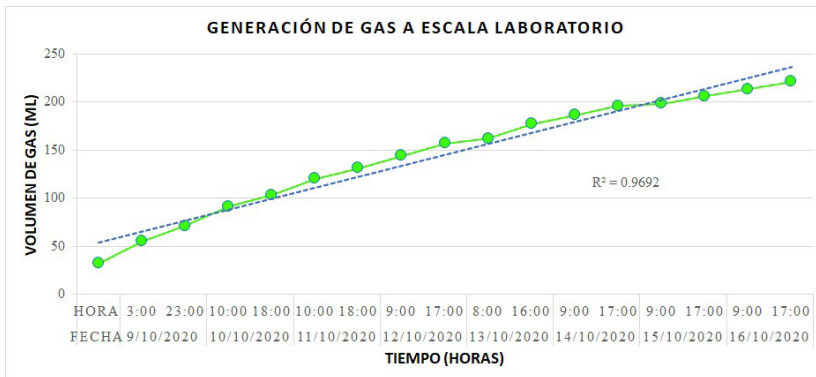


Figura 5. Generación de gas metano en CCMs a escala laboratorio
Fuente: Los autores. Trabajo de campo 2020.

Teniendo en cuenta los valores generados de gas por la celda, se relaciona con la cantidad de gas que podría generar y se determina el porcentaje de eficiencia de la celda, bajo las condiciones de su funcionamiento, dicha eficiencia se determinó en 4,5%.

3.3.2 Análisis de la generación de gas metano

Un aumento en el pH de las aguas residuales tratadas, el cual llegó a obtener un promedio de 9, por fuera del rango entre 6,8 y 8, este pH elevado inhibe el proceso de metanogénesis y dificulta el proceso de fermentación, de igual manera se relaciona con el primer proceso de fermentación del sustrato denominado hidrólisis (Villacrés, 2016), corroborado con la presencia de oxígeno disuelto, el cual evidencia que la cámara anódica se encontraban en el proceso de transición hacia un ambiente anaerobio. De igual manera para alcanzar un ambiente anaerobio los valores del porcentaje de óxido-reducción debe estar en el rango de -350 y -550 en la cámara anódica, la CCM después del tiempo de retención se encontraba en valores de -274.3 en el ánodo, por ende, el desarrollo de las bacterias metanogénicas aún estaba en su etapa de adaptación (Mulcué-Nieto & Mora-López, 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, se espera un mayor rendimiento en la generación de gas con el aumento del tiempo de retención del sustrato dentro de la CCM o con la implementación de un sistema de aclimatación bacteriana (Reyes Aguilera, 2016); Pero por factores externos que dificultó la disponibilidad de tiempo, el análisis de cada celda se desarrolló en 10 días.

4. Referencias

- Aguirre Ossa, F. J. (2018). *Estado actual de la obtención de gas metano a partir de Biodigestores en eje cafetero colombiano*. <http://localhost:80/jspui/handle/123456789/106>
- Alzate-Gaviria, L., Fuentes-Albarrán, C., Álvarez-Gallegos, A., & Sebastian, P. J. (2008). Generación De Electricidad A

- Partir De Una Celda De Combustible Microbiana Tipo PEM. *Interciencia*, 33(7).
- Carlin, R. E., Escuela, S., Panamericana, A., & Honduras, Z. (2015). *Evaluación del potencial energético a partir del metano producido por codigestión de residuos de alimentos y estiércol vacuno*.
- Lee, K. Y., Choi, I. K., & Lim, K. H. (2019). Nitrogen removal and electrochemical characteristics depending on separators of two-chamber microbial fuel cells. *Environmental Engineering Research*, 24(3), 443-448. <https://doi.org/10.4491/EER.2018.211>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *INFORME DE GESTIÓN SECTOR AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE-2012*.
- Morillón-gálvez, V. (2016). Potencial de generación de biogás de un rancho ganadero en la comunidad de San Bartolo Cautlalpan. En *Artículo Revista de Sistemas Experimentales Septiembre* (Vol. 3, Número 8). www.ecorfan.org/bolivia
- Mulcué-Nieto, L. F., & Mora-López, L. (2014). A new model to predict the energy generated by a photovoltaic system connected to the grid in low latitude countries. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.04.030>
- NASA. (1967). *Termodinámica y aplicaciones de sistemas de conversión de energía bioelectroquímica* (NASA (ed.); 2.^a ed., Vol. 1). NASA. http://oa.upm.es/38735/1/amd-apuntes-termodinamica-v3_0.pdf
- Pannell, T. C., Goud, R. K., Schell, D. J., & Borole, A. P. (2016). Effect of fed-batch vs. continuous mode of operation on microbial fuel cell performance treating biorefinery wastewater. *Biochemical Engineering Journal*, 116, 85-94. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2016.04.029>
- Pineda, A., & Rosas, M. (2016). *Estado Del Arte En Celdas De Combustible Microbianas (Ccm) Para*

Producción De Bioenergía [Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3837/PinedaMarínAnadelPilarRosasTafurMarthaLizeth2016.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Revelo, D., Hurtado, N., & Ruíz, J. (2013). Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica - Dialnet. *Información tecnológica*, 24(6), 17-28. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7390131>

Revelo, D. M., Hurtado, N. H., & Ruiz, J. O. (2013). Celdas de combustible microbianas (CCMs): Un reto para la remoción de materia orgánica y la generación de energía eléctrica. *Informacion Tecnologica*, 24(6), 17-28. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000600004>

Reyes Aguilera, E. A. (2016). Producción de biogas a partir de Biomasa. *Revista Científica de FAREM-Estelí*, 17, 11-22. <https://doi.org/10.5377/farem.v0i17.2610>

Ríos Lara, S. C. (2016). *Generación de bioelectricidad microbiana con estiércol de ganado vacuno, mediante celdas de combustible microbiano, Estación Experimental Tunshi ESPOCH* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5662>

Valencia-Zuluaga, T., Rivera-Rodriguez, S. R., & Sánchez-Ortíz, N. (2017). Patents Consulting Use Potential for Determining the State of the Art. Analysis in Microgrids with Renewable Energy Sources. *Colombia Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*.

Vázquez, M., & Marjorie. (s. f.). Tecnologías no convencionales para el tratamiento de las aguas residuales en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. *Matices del Posgrado Aragón*, 5(13). Recuperado 20 de abril de 2021, de <http://www.revistas.unam.mx/index.php/matices/article/view/25740>

- Villacrés, M. (2016). *Evaluación del potencial de biomasa residual del ganado porcino para el aprovechamiento energético en la granja porcina García en el cantón La Maná barrio Miraflores sector El Toquillal en el año 2016. Diseño de un biodigestor alternativo para este propósito.* [Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi: Dirección de Posgrados.]. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6068>
- Wei, C. H., Harb, M., Amy, G., Hong, P. Y., & Leiknes, T. O. (2014). Sustainable organic loading rate and energy recovery potential of mesophilic anaerobic membrane bioreactor for municipal wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 166, 326-334. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.053>

Capítulo 6

Impacto en los rendimientos financieros de la aplicación de estrategias verdes en las industrias bogotanas⁶

Impact on financial returns of the application of green strategies in Bogota industries

6 Autores: García Castiblanco Claudia Paola, Díaz Ariza Diana Marcela, Pinzón Muñoz Carlos Andrés. Universitaria Agustiniana. Bogotá. Colombia

RESUMEN

Con el reconocimiento de los Estados sobre la necesidad de promover cambios en las formas de producción y consumo, de manera tal que sean más amigables con el medio ambiente, las empresas han tenido que definir la forma en la que afrontan estos cambios, bien sea adoptando estrategias que pueden ser reactivas (las que les obliga la ley) o proactivas (de adopción voluntaria yendo más allá de las obligatorias). Sin embargo, se requiere que las empresas perciben algún tipo de beneficio para que su implementación sea más atractiva. Por lo que el objetivo de esta investigación es el analizar si las empresas de Bogotá actúan de manera reactiva o proactiva frente a la adopción de prácticas ambientales y a su vez identificar la existencia o no de beneficios financieros. Para el desarrollo del estudio fueron encuestadas 52 de las 57 empresas del sector industrial que participan en el programa de gestión ambiental empresarial de la Secretaría Distrital de Ambiente. Dentro de los principales resultados se encuentra que no hay mayor diferencia en los beneficios recibidos entre empresas reactivas y proactivas.

Palabras clave: Desarrollo sostenible; Economía verde; Rentabilidad

ABSTRACT

Having recognized by the United States of America regarding the requirements of promoting some changes on production and consumption so, in this way they might be more environmentally friendly, the way of facing these changes have been delineated, either by adopting strategies that might be reactive (those which are ordered by the law) or proactive (voluntary adoption beyond the mandatory ones). Though companies are required to receive some kind of assistant to make their implementation more tempting. Thus, this research aims to inspect if companies in Bogota are taken action reactively or proactively in the adoption of environmental practices and at the same time

to determine the existence or not financial support. 52 of 57 industrial companies which take part in the natural resources business management program of the Environment District Administration were interviewed. One of the elicited results is that there is no difference in the received benefits among the reactive and proactive enterprises.

Key words: Sustainable development; Green economy; Financial profit.

Introducción

El evidente deterioro del medio ambiente a causa de la explotación de recursos naturales con fines económicos o por la contaminación causada por la industria, conllevó a que en las últimas décadas se comenzaran a cuestionar los modelos tradicionales de producción. Siendo la Organización de las Naciones Unidas (ONU, 1991) el ente supranacional encargado de la política internacional, ha sido el responsable de denunciar y buscar soluciones a la problemática en mención. Es así como en 1972 celebró en Estocolmo, Suecia, la *Cumbre sobre el Medio Humano*, en la que se plantearon los riesgos para el planeta del daño causado por el hombre y la responsabilidad que tiene de su protección.

En 1987 a solicitud del ente supranacional, es presentado el *Informe Brundtland*, también conocido como *Nuestro Futuro Común*, uno de los primeros documentos en los que se analiza la relación entre deterioro ambiental y desarrollo industrial, reconociendo que si bien este último ha tenido impacto positivo en la mejora del nivel de vida, así mismo ha implicado un mayor uso de materias primas y de energía no renovable, generando emisión de gases de efecto invernadero, polución, desperdicios tóxicos, deforestación, extinción de especies (fauna y flora), entre otros.

Más allá del penoso balance ambiental presentado por el Informe Brundtland (1987), este documento alcanzó el reconocimiento mundial al proponer el *desarrollo sostenible* como la alternativa a las formas tradicionales de producción. La premisa es sencilla: el satisfacer las necesidades del presente no debe comprometer las del futuro. La idea se sustenta en que debe existir una integración entre las políticas ambientales, el desarrollo y la comunidad internacional, ya que el deterioro ambiental no conoce fronteras y si bien no se puede obligar a los estados a seguir patrones de producción, debe haber características comunes derivadas del consenso en las que como mínimo, el desarrollo no ponga en peligro los sistemas naturales que sustentan la vida en la tierra.

Cinco años después de la aparición del Informe Brundtland la ONU desarrolló la *Cumbre de la Tierra* de 1992, la cual marcó un punto de quiebre al lograr la firma de una Declaración sobre Medio Ambiente y Desarrollo en la que se expresa el derecho de los seres humanos a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza. De igual manera, aunque se reconoce el derecho de los estados a explotar sus recursos, se establece que tienen la responsabilidad de velar porque estas actividades no causen daño a otros estados. Teniendo en cuenta la imposibilidad de limitar el deterioro ambiental a las fronteras, esto implica un compromiso por parte de los gobiernos de ejercer control estricto a las actividades en territorio nacional.

A medida que desde la comunidad internacional se generaban los avances mencionados en la búsqueda por reconciliar el crecimiento económico con la protección del medio ambiente, desde la academia también se empezaron a desarrollar estudios alrededor de la materia. En este sentido, se le reconoce a (Barbier & Markandya, 2013) el haber sido los primeros en hablar de *economía verde*, como la forma de hacer referencia a la necesidad de realizar una transición entre las formas tradicionales de producción a unas más ambientalmente amigables.

En su libro *Blueprint for a Green Economy*, (Barbier et al, 1989)

parten de cuestionar el informe Brundtland haciendo énfasis en que es necesario aclarar lo que implica el desarrollo sostenible, ya que esto genera incertidumbre a los gobiernos respecto a qué en concreto se debe hacer para alcanzar los objetivos planteados. Este es el punto de partida de una serie de investigaciones que abordan el tema desde diversas perspectivas como el intentar identificar qué elementos conllevan a que las empresas decidan adoptar prácticas verdes en la producción; si es debido a un factor de competitividad por la presión de la competencia (Leonidou et al., 2015) y de los consumidores (Zhu et al., 2012), o porque las leyes los obligan (Caprotti & Bailey, 2014; Musvoto et al., 2015) o porque mejora su posibilidad de penetrar mercados en el extranjero (Martín-Tapia et al., 2010), entre otros.

Sobre la relación entre la incorporación de estrategias verdes y el desempeño financiero de las organizaciones se ha escrito mucho y con resultados incluso contradictorios. Algunos estudios muestran que esta relación es positiva y significativa (Clarkson et al., 2011; Sen et al., 2015), otros evidencian una relación negativa (Lucas & Noordewier, 2016; Shahedul Quader et al., 2016); y en otros casos no es concluyente (P. H. Chen et al., 2016).

Más allá de los resultados de las diversas investigaciones, es claro que el discurso ambiental no tiene futuro si en él no se involucra al sector productivo, que es en últimas quien tiene la posibilidad de poner en marcha verdaderos cambios que mitiguen el daño. En el caso colombiano, se identifica que el tema ha venido tomando relevancia de manera reciente con la expedición por ejemplo del Decreto 1299 de 2008, mediante el cual se reglamenta el Departamento de Gestión Ambiental de las empresas a nivel industrial, o el lanzamiento del Plan Nacional de Negocios Verdes en 2012 que busca promover el biocomercio en el país. Las estrategias pueden ser reactivas (obligando mediante la ley) o proactivas (de adopción voluntaria), pero si las empresas no perciben algún tipo de beneficio no será atractiva su implementación.

En Colombia no se encuentran estudios que indiquen el tipo de efecto que tiene la adopción de estrategias verdes para las finanzas de las empresas, por lo que el objetivo de esta investigación es el analizar si las empresas de Bogotá actúan de manera reactiva o proactiva frente a la adopción de prácticas ambientales y a su vez identificar la existencia o no de beneficios financieros. Para el desarrollo del estudio fueron encuestadas 52 de las 57 empresas del sector industrial que participan en el programa de gestión ambiental empresarial de la Secretaría Distrital de Ambiente, se consideraron sus indicadores financieros y se realizaron entrevistas a profundidad con cinco gerentes de estas organizaciones.

El presente documento inicia con el desarrollo teórico de la competitividad ambiental. Posteriormente, se aborda la diferenciación entre la postura reactiva y proactiva que pueden tener las empresas al definir sus estrategias. En tercer lugar, se presenta la metodología del estudio seguida por los resultados y la discusión del mismo. Finalmente, se plantean las conclusiones y se delinear algunos caminos para proseguir la investigación en este campo.

1. Competitividad ambiental: ganancias por buen comportamiento

La pregunta del millón para muchos empresarios puede ser ¿qué ganan sus compañías por cambiar sus modelos tradicionales de producción y promover prácticas ambientalmente amigables? Una de las posibles respuestas es: los beneficios económicos que de allí pueden desprenderse.

Es así como la competitividad ambiental aparece en escena y se propone como una herramienta útil y atractiva para los productores.

(Porter & Van Der Linde, 1995) son quienes introducen la teoría de la competitividad ambiental en el discurso de la sostenibilidad. Apelan a la innovación que se puede desarrollar en los procesos productivos con miras a ser más eficientes y ambientales como factor de competitividad. Según los autores en los niveles industriales, la competitividad puede darse por la capacidad de tener una productividad superior, ofrecer más bajos costos que los rivales o incluso por la habilidad de generar un producto de mayor precio, pero con un valor agregado. Lo que Porter y van der Linde argumentan es que el aplicar estrategias ambientales, así sea limitándose a cumplir con lo exigido por la ley, pueden acceder a "*Innovation offsets*" lo que se puede entender como *compensaciones por innovación*, las cuales se hacen evidentes no solo con la reducción de costos, sino que además puede dar ventajas competitivas a las empresas en mercados extranjeros con regulaciones diferentes (inferiores en términos de exigencia).

Para (Porter & Van Der Linde, 1995) las compensaciones por innovación pueden darse de dos formas: compensaciones por producto y compensaciones por proceso. Las compensaciones por producto son el resultado de la aplicación de las regulaciones ambientales donde no sólo se reduce la polución, sino que además se genera un mejor desempeño y mejor calidad en los productos (productos más seguros y menos costos de producción).

Las compensaciones por proceso se dan cuando, como resultado de la aplicación de las regulaciones ambientales, no sólo se reduce la polución sino que además se incrementa la productividad a través de mayor rendimiento, disminución de tiempos de inactividad, monitoreo cuidadoso, reducción o reciclaje de materiales, disminución del consumo de energía durante el proceso de producción, reducción de materiales en

almacenaje, reducción del desperdicio, reducción en el costo del manejo de desperdicios, conversión de desperdicios en forma de valor, entre otros.

Pero para hacer del desarrollo sostenible una estrategia de competitividad las empresas deben ver en la economía verde una oportunidad y no una costosa amenaza. La identificación de costos y beneficios de la aplicación de estrategias ambientales es la tarea de inicio para las organizaciones que incursionan en el proceso. Porter y van der Linde explican que son pocas las compañías que conocen el verdadero costo de la toxicidad y el desperdicio, y más pocas aún investigan cómo la reducción de costos de toxicidad y desperdicio las beneficia. Una vez los costos ambientales son medidos y entendidos el siguiente paso es adoptar soluciones innovadoras.

Sin embargo, la realidad indica que para muchas compañías alrededor del mundo, sin las presiones por parte de los Estados, difícilmente las empresas iniciarán la transición hacia la aplicación de estrategias ambientalmente amigables. Los estudios de (Caprotti & Bailey, 2014; Musvoto et al., 2015), lo confirman, y precisan que se requiere de un verdadero compromiso por parte de las autoridades políticas en la creación y ejecución de un marco jurídico, dentro del cual se puede contemplar el empleo de incentivos o subsidios, así como también de presiones y sanciones. Pero, de igual modo, es necesaria la creación y coordinación entre diferentes instituciones del gobierno para poder hacer seguimiento y control de lo establecido en la ley.

Es de aclarar que en el actual contexto mundial, las presiones no se limitan a las regulaciones o normatividad propia de cada país. (Lee et al., 2013) lo demuestran al identificar otras cuatro fuentes de coerción: consumidores, competencia, empleados y administradores. De lo anterior se deduce que no sólo los sistemas de producción están en una fase de transición, sino

que el mercado en general se mueve hacia unos patrones de consumo coherentes con la economía verde y la sostenibilidad.

En la actualidad existe un nicho de mercado a explotar si se cuenta con el factor diferenciador, que en este caso consiste en poder garantizar al consumidor procesos ambientalmente amigables con la adopción de diferentes prácticas como el uso eficiente del agua y la energía, el reciclaje y la disminución en la polución, entre otras. Esto a su vez tiene un impacto en términos de competencia, ya que, si el consumo y la producción se dirigen en este camino, quienes no lo tomen correrán el riesgo de desaparecer. De esta forma, la adopción de una mentalidad ambiental puede ser una decisión que favorezca al negocio.

1.1 Entre la reactividad y proactividad ambiental

Los marcos normativos y las instituciones de control constituidas por los gobiernos, son en muchos casos, el primer paso para que las empresas comiencen a incursionar en procesos de producción más limpia. Sin embargo, al ser estos procesos de tipo coercitivo, implica también que las acciones resultantes son de carácter reactivo donde el objetivo primordial es el eludir las penalizaciones de las que pueden ser objeto.

Pero no todas las organizaciones asumen la adopción de estrategias verdes desde la obligatoriedad de la ley, lo cierto es que en algunas empresas se abordan estos procesos de forma proactiva, al identificar la ejecución de prácticas ambientalmente amigables como un instrumento útil de competitividad. La proactividad ambiental desde la perspectiva de (González-Benito, 2006; Lannelongue et al., 2014), es entendida como un objetivo de la administración en el que se evidencia una clara intención en generar acciones voluntarias dirigidas al diseño y desarrollo de programas o prácticas para reducir el impacto ambiental.

(Rockström et al., 2009) menciona que en las multinacionales el tema verde comenzó a ser integrado en la administración de una forma proactiva desde la aparición misma del Informe Brundtland como un asunto de alta importancia estratégica, en el que ser sostenible implicaba el ir más allá de lo normativo y requería incluir prácticas de prevención de la contaminación, supervisión de productos y responsabilidad social, lo que pone de manifiesto no solo la capacidad de adaptabilidad de este tipo de empresas ante los vientos de cambio en el contexto, sino además una visión progresista por parte de sus equipos directivos que de inmediato percibieron los nuevos desafíos, sin dejar de reconocer las oportunidades de mercado y posibles beneficios para la organización.

No ocurre igual con las pequeñas y medianas empresas (pymes), en las que el desarrollo de nuevas formas y técnicas de producción puede ser mucho más lento y difícil dados los costos de su implementación. En este sentido parece haber consenso entre los investigadores en cuanto a que el tamaño de la empresa tiene un efecto en la capacidad de adoptar estrategias proactivas, siendo las más pequeñas las menos favorecidas (Y. S. Chen & Chang, 2013; Martín-Tapia et al., 2010; Moini et al., 2014; Noci & Verganti, 1999; Song et al., 2017). La razón puede encontrarse en la falta de recursos para ejecutar cambios estructurales dirigidos al desarrollo de una producción más limpia, pero además a la carencia de interés en la materia por parte de sus directivas.

El *liderazgo verde* se propone así como una característica determinante en la configuración de una empresa proactiva, por lo que éste es definido como: La habilidad de influenciar individuos y movilizar organizaciones para desarrollar una visión a largo plazo de sustentabilidad ecológica (Egri & Herman, 2000).

Diferentes estudios han intentado determinar las características de directivas que ejercen liderazgo verde y llevan a sus empresas por el camino de la proactividad, pero (Boiral et al., 2014), logran

identificar tres categorías de análisis de acuerdo a al grado de apertura de las directivas ante el tema de la siguiente forma: 1. *Pre-convencional*: están caracterizados por el oportunismo, actuar por impulsos y manifestar una conducta autoproteccionistas, por lo mismo no tienen una orientación a adoptar el liderazgo y proactividad ambiental que implique pensar en los intereses comunes y a largo plazo; 2. *Convencional*: se caracterizan por la adaptación a reglas sociales, valores y convicciones y de quienes se puede esperar una actitud más abierta hacia el tema; 3. *Post-convencional*: son sólo el 15% de la población, cuestionan y mejoran creativamente las reglas existentes, interactúan fácilmente con los stakeholders y manejan los problemas con mayor proactividad que sus contrapartes convencionales. Otros estudios realizados en diferentes partes del mundo, ratifican que el éxito de incursionar en negocios más sostenibles depende en gran medida de que exista un cambio de mentalidad a favor de éstos en las diferentes instancias administrativas de la organización (Chang & Chen, 2013).

En una búsqueda más amplia por determinar de las características que hacen de una empresa ambientalmente proactiva, (González-Benito & González-Benito, 2006), además de registrar la importancia de la actitud de las directivas, enmarcan ésta y otras particularidades que finalmente son agrupadas en tres categorías: 1. Planificación y prácticas organizativas que reflejan la aplicación de la adopción de un sistema de gestión ambiental, 2. Prácticas operacionales como reciclaje, reutilización y reducción, o el desarrollo e implementación de métodos o procesos de manufactura ambientalmente amigables y 3. Transparencia en la información financiera, ambiental y social.

Los autores definieron además tres variables que inciden en el desarrollo de acciones proactivas, clasificadas de la siguiente forma de acuerdo a lo hallado en la revisión de la literatura:

1. Factores internos: a) Tamaño de la empresa y disponibilidad de recursos (las empresas grandes tienen más recursos, pero también tienen más presión social). b) Internacionalización. c) Posición en la cadena de valor. d) actitud gerencial y motivaciones.
2. Factores externos: a) sector industrial (las industrias petrolera, química y papelera son asociadas con los más bajos desempeños ambientales). b) ubicación geográfica (regiones más reguladas concentran empresas más proactivas).
3. Presiones de los stakeholders (González-Benito & González-Benito, 2006).

Esta definición de características y variables permite el establecer categorías de análisis mediante las cuales se pueda medir el esfuerzo que realizan las empresas en su actividad ambiental. Aunque el estudio de todas en conjunto revierte dificultad, son el punto de partida para definir el grado de proactividad de una empresa, sector o país.

Ahora bien, cierto es que la proactividad no necesariamente es mejor que la reactividad ya que los beneficios, producto de la adopción de prácticas verdes, no parece estar amarrado a un comportamiento en particular y aunque se pensaría que las empresas proactivas están a la vanguardia, los resultados finales pueden no ser los esperados.

1.2 Efectos de la implementación de estrategias verdes proactivas o reactivas

La adopción de prácticas ambientalmente amigables puede ser costosa para las empresas, no sólo en términos de la afectación de sus finanzas si no en general en los cambios organizacionales que ello implica. Sin embargo, un factor motivante, más allá de eludir las penalizaciones de la ley, es la promesa de disfrutar

de algunos beneficios como puede ser el reconocimiento y posicionamiento frente a la competencia, mayor acceso a mercados extranjeros y/o una mejora en los estados financieros. Pero no todas las investigaciones respaldan esta premisa y por el contrario se encuentran resultados diversos.

En cuanto a la competencia en los mercados, se encuentra que esta influye de manera positiva en la adopción de estrategias relacionadas con el medio ambiente (Leonidou et al., 2015) así como también se ve favorecida por ellas, pues otorga un factor diferenciador y permite que la empresa se acerque al segmento del mercado que corresponde a los consumidores conscientes. Sin embargo, esta suele ser una respuesta reactiva, que, si bien no obedece a las disposiciones legales del gobierno, responde a otro tipo de presiones externas. (Gadenne et al., 2009), advierten que estas tienden a producirse sin que dueños y administradores tengan fuertes actitudes a favor de la aplicación de prácticas ambientales, pero están dispuestos a cambiar sus procesos de producción y estrategias ambientales esperando los beneficios que sus acciones le pueden generar.

Comportamiento similar se identifica respecto a la apertura de mercados en el exterior. Al evaluar si existe un aumento en la participación internacional a través de exportaciones gracias a poseer productos realizados con procesos sostenibles, los resultados de la mayoría de las investigaciones son positivos; (Martín-Tapia et al., 2010) analizaron este fenómeno en la industria alimenticia de España y encontraron que las pymes desarrollan ventajas intangibles como reputación, aprendizaje, integración con los Stakeholders etc., lo que las beneficia en los procesos de internacionalización.

Pero, así como la adopción de prácticas verdes favorece las exportaciones, la internacionalización y la expectativa de entrar a nuevos mercados, también favorecen la adopción de más estrategias verdes, generando una relación entre las

dos variables. (Luan et al., 2016), demostraron que el grado de internacionalización afecta positivamente las prácticas ambientales, pues a mayor internacionalización se busca un mayor número de certificaciones verdes que permita el ingreso a mercados con estándares más altos de calidad; esto significa que para asumir los retos de la expansión internacional, las firmas buscan acatar las leyes locales que se están haciendo más rígidas.

Sin embargo, en cuanto a la mejora en los rendimientos financieros, los resultados no son tan contundentes y se encuentra que la adopción de prácticas verdes puede traer tanto beneficios como no generar ningún tipo de impacto. Dentro de los estudios con resultados positivos está el de (Clarkson et al., 2011), quienes examinan qué factores afectan las decisiones de las empresas para adoptar una estrategia ambiental proactiva y si la adopción de estrategias ambientales proactivas conduce a un mejor desempeño financiero. El estudio fue realizado en diferentes industrias altamente contaminantes de Estados Unidos y los resultados indican que las empresas que eligen mejorar su desempeño ambiental de manera significativa a lo largo del tiempo (empresas “progresistas”) tienden a experimentar mejoras en sus recursos financieros y capacidades de gestión. Además, las empresas progresistas parecen gozar de beneficios económicos reales como consecuencia de la mejora del rendimiento medioambiental en función de la rentabilidad (ROA) y del flujo de caja (CF), en comparación con las empresas pares que deciden no cambiar.

Otro estudio que encuentra resultados positivos es el de (Sen et al., 2015), trabajo que analizó si la proactividad ambiental tiene un efecto positivo en el mejoramiento del desempeño financiero en las empresas manufactureras. Compararon las industrias de India y Gran Bretaña y el desempeño financiero se evaluó por: 1. aumento de los ingresos, 2. aumento de la ganancia/reducción del costo de producción, y 3. mayor retorno sobre el patrimonio y flujo de efectivo.

La otra cara de la moneda es registrada por (Ghisetti & Rennings, 2014), para quienes la adopción de una innovación ambiental no influye en la rentabilidad de las empresas. La afirmación se genera luego de analizar distintas empresas alemanas y de concluir que no todas las estrategias tienen los mismos efectos sobre rentabilidad. De este modo, si se mira las innovaciones que conducen a una reducción en el uso de la energía y recursos, se concluye que definitivamente vale la pena ser verde. Pero si se habla de reducir materiales nocivos, disminución de contaminación del aire, el agua, el ruido y la contaminación del suelo, no se encuentran efectos positivos en las finanzas de las empresas, menos en el corto plazo cuando la regulación ambiental tiene que ser encarada de un momento a otro y con obligatoriedad.

Más interesante aún son los resultados obtenidos por (Lucas & Noordewier, 2016), la investigación diferencia entre las empresas que aplican prácticas ambientales porque el entorno (legislación, sociedad) las presionan, lo que a su vez genera presión sobre las empresas pasivas, o por motivaciones reactivas. Como conclusión se encuentra que las empresas no proactivas que implementan prácticas ambientales, no sólo mejoran su desempeño financiero sino que es mayor al encontrado en las empresas proactivas, lo que va en contravía de las expectativas.

Como se aprecia, en la práctica, la ejecución de estrategias verdes no proporciona un comportamiento regular, por el contrario, causas y consecuencias de su aplicación varían dependiendo del lugar, el tamaño de la empresa, el sector económico al que pertenecen, la orientación de las directivas, los mercados a los que se dirigen, etc., vale la pena entonces el hacer una breve revisión de cómo opera esta situación en el país e intentar determinar, con base en los estudios previos, los efectos para la industria nacional, o en este caso la bogotana.

1.3 El discurso ambiental en Colombia

Colombia tiene la fortuna de estar ubicada geográficamente en una zona de importante riqueza ambiental. De hecho, toda América Latina es reconocida por su biodiversidad, la Amazonía, por ejemplo, permite comprender la relevancia de esta región en materia de proliferación de recursos naturales. Sin embargo, también es conocida la situación económica de la mayoría de los países que la comprenden, donde son comunes los altos índices de desigualdad, la pobreza, el desempleo, entre otros problemas.

El informe GEO de la ONU registra que, aunque América Latina produce solo el 5% de los gases de efecto invernadero, su contribución viene en aumento debido a las presiones de la industria. Se identifica también una reducción en bosques desde 1990 del 9,4% y como lo indica el informe, dentro de las más graves afectaciones está el hecho que los glaciares andinos que son fuente hídrica de millones de personas empiezan a desaparecer (Programme, 2016)

Dentro del continente, Colombia, cuenta con una amplia extensión territorial que abarca 1.138.910 Km² que le permiten tener diferentes tipos de climas, ecosistemas, fuentes fluviales, costas marinas etc., pero también alberga 47 millones de personas de las cuales 8.586.000 luchan por la subsistencia (DANE, 2018), lo que implica la existencia de una considerable dependencia de la explotación de recursos agrícolas y minerales, que no en todos los casos se realiza de manera sostenible. Además, según el DANE (2017), el crecimiento industrial en Colombia también va en aumento con picos incluso del 4% en 2011, pese a que el comportamiento en la capital, Bogotá, tiende a registrar decrecimientos en algunos trimestres del 2012, 2013, 2015 y 2017.

Sin embargo, Colombia se ha comprometido a reducir las emisiones de gases para el 2030. De hecho, ya cuenta con el Decreto 298 de 2016 por medio del cual se establece la

organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático. Hay que tener presente que el país hace parte del Convenio Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas desde 1994, lo que se reafirmó con la adopción del protocolo de Kioto a través de la ley 629 de 2000 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2013)

El país mantiene la visión clásica del desarrollo económico, pero así mismo acepta la necesidad de generar un grado de protección para el medio ambiente, por lo cual se empieza a promover una producción y consumo responsable. Lo anterior se evidencia en la Encuesta Ambiental Industrial, que tiene por objetivo el cuantificar los esfuerzos económicos de gestión ambiental que se vienen desarrollando en el país desde el sector manufacturero.

Los resultados de la encuesta muestran que para el 2016, los establecimientos industriales invirtieron en activos (compra o adquisición de maquinaria, y equipos, tierras, construcciones y edificaciones) \$236.243 millones de pesos, los cuales fueron destinados en un 52% a la protección del aire y 37% al tratamiento de aguas residuales. Siendo las industrias de minerales no metálicos y la alimenticia, los sectores que hicieron los principales esfuerzos en esta materia. Esa misma encuesta devela que Bogotá es la región que más invirtió aportando \$28.632 millones de pesos (DANE, 2016).

En cuanto a los gastos en protección y conservación (adquisición de materias primas, mantenimiento, mediciones del ambiente) estos alcanzaron los \$465.021 millones. Los mayores gastos se registraron en gestión de aguas residuales (47%) gestión de residuos (30%) y protección del aire (17%). Los sectores que realizaron los mayores gastos fueron nuevamente las industrias de minerales no metálicos y la alimenticia. En este caso, Bogotá hace los mayores esfuerzos económicos al gastar \$93.366 millones (DANE, 2018).

Con el ánimo de dar herramientas de acción a las regulaciones ambientales en el año 2008, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, expidió el decreto 1299, mediante el cual reglamentó que todas las empresas del sector industrial del país que por su actividad requirieran permisos, licencias y planes de manejo ambiental, debían establecer los mecanismos para tener un Departamento de Gestión Ambiental – DGA, que se encargaría de velar por el cumplimiento de las normas ambientales, pero a su vez gestionar para minimizar los diferentes impactos ambientales (*Decreto 1299 de 2008*, 2008).

En la capital del país Bogotá, existe la Secretaría Distrital de Ambiente con el objetivo de dar respuesta a los retos ambientales, las disposiciones generadas en la materia desde el gobierno central y como parte de la organización administrativa de la ciudad. La Secretaría ha diseñado un programa de *Gestión Ambiental Empresarial*, el cual busca apoyar a las empresas a adoptar prácticas ambientalmente amigables a través del curso de diferentes niveles del Programa de Excelencia Ambiental Distrital (PREAD), cuyo objetivo se ha centrado en ofrecer asesoramiento y apoyo técnico a las empresas más allá de la normativa, es decir, apoyar para que las empresas desarrollen estrategias de proactividad ambiental. Para el 2017, el programa tenía vinculadas 57 empresas del sector industrial, adicional a otras del primer y segundo sector, mediante las cuales se puede evaluar la posición de la industria bogotana frente a la transición hacia una economía verde y sus beneficios.

En este contexto, el objetivo del proyecto que da origen a la presente reflexión académica busca determinar si el hecho de que una empresa sea más proactiva en términos ambientales que otra, tiene efectos positivos en su rendimiento financiero. En otras palabras, se pretendió verificar con las industrias del programa de la Secretaría Distrital de Ambiente sí participar de estas iniciativas incide en mejorar el desempeño financiero.

2. Metodología

Para lograr el objetivo establecido, se tomaron las empresas del sector industrial de Bogotá que participaron a 2017, en el programa de gestión ambiental empresarial de la Secretaría Distrital de Ambiente; esta información es pública y se encuentra en el ecodirectorio disponible en la web de la entidad. De acuerdo con dicho listado, se identificaron 57 empresas de este sector inscritas al programa.

Se diseñó un instrumento de recolección de información sobre aspectos generales de la empresa y aplicación de estrategias ambientales. De otro lado, de una base de datos se obtuvo la información de indicadores financieros; de tales indicadores se decidió trabajar con el ROE (rentabilidad sobre patrimonio neto), siguiendo lo señalado por estudios previos (Clarkson et al., 2011; Song et al., 2017).

A través de una empresa encuestadora, vía mail y vía telefónica, se hizo llegar la encuesta a las 57 empresas identificadas previamente, de las cuales se recibió el instrumento completamente diligenciado de 52. Se buscó la información del ROE de los últimos 5 años para esas 52 empresas, sin embargo, solo se encontraron datos disponibles para 43, lo cual da un 73% de las empresas identificadas con información completa. A su vez, se solicitó entrevista personal con el gerente general o el encargado del departamento de gestión ambiental de cinco de las compañías, a fin de profundizar en algunos aspectos concernientes al desarrollo de estrategias ambientales.

Las estrategias sobre las cuales se consultaron a los empresarios fueron clasificadas en reactivas, aquellas que responden a aspectos normativos, es decir, la adopción de diferentes decretos y disposiciones del gobierno, en la materia para el sector industrial,

y estrategias proactivas, que no son requerimientos de ley y son desarrolladas por las empresas de manera optativa, siguiendo los criterios de (Sen et al., 2015). Esto permitió identificar el tipo de comportamiento ambiental de las empresas y se determinó, que si una organización tiene el 70% del total de sus estrategias como proactivas, se asume que su comportamiento es proactivo. Pero si del total de sus estrategias menos del 70% son proactivas, se clasifica como reactiva.

3. Resultados

De las empresas que se obtuvo la totalidad de datos (43), se encontró que el 6,9% son pequeñas, 53,5% medianas y 39,5% grandes. Así mismo, de estas empresas del sector industrial tienen en su mayoría (93%) más de 10 años de funcionamiento, lo cual es coherente con los estudios que señalan que las organizaciones que tienden a incorporar estrategias ambientales son, generalmente, medianas o grandes y con varios años de funcionamiento (Aguilera-Caracuel et al., 2012; Aragón-Correa et al., 2008).

El 72% de las empresas empezó a incorporar estrategias ambientales luego de la expedición del decreto 1299, que regula los departamentos de gestión ambiental en la industria, lo cual es indicativo de los efectos que tuvo dicha legislación, el 28% restante ya venía trabajando este tipo de iniciativas previo a la legislación, encontrando experiencias en este sentido desde 1980.

Otro indicador de la incorporación de estrategias ambientales, es la búsqueda de sellos o certificaciones ambientales. De los datos obtenidos de las organizaciones, se identifica que el 18,6% cuenta con un sello o certificación, entre estos se cuentan Certificación

PREAD-SDA (50%), FSC (25%), Carbono neutro (12,5%) e ISO 14001 (12,5%).

Acerca de beneficios y dificultades encontradas por estas organizaciones, a propósito de la incorporación de estrategias verdes, manifestaron en un 90,6% haber obtenido beneficios de este proceso; de las empresas que identificaron aspectos positivos para su desarrollo, dieron cuenta de incentivos tributarios (43,5%), reducción de costos (38,4%), apertura de nuevos mercados (12,8%) y generación de nuevos productos (5,1%).

Sobre las dificultades, el 32,5% manifestó haber tenido problemas con la incorporación de estrategias verdes, de éstos, el 42,8% identificó incremento de costos; 28,6% dificultad en la interpretación de las normas; 14,3% problemas de conocimientos técnicos y en un 7,14% barreras para ingresar a nuevos mercados y otros, respectivamente.

Sobre la aplicación de estrategias ambientales se consultó por 32 estrategias en total, de las cuales 21 correspondían a proactivas y 11 a reactivas. Para cada empresa, se totalizó el número de estrategias tanto proactivas como reactivas, determinando así el porcentaje de aplicación tanto de unas como de otras. En este sentido, se encontró que el 98% de las empresas aplican más del 50% de estrategias de tipo reactivo (las asociadas a la norma), y el 100% de las empresas aplica más del 50% de estrategias proactivas.

De acuerdo con el criterio establecido para definir si una empresa es proactiva o reactiva, en términos ambientales, se encontró que 69,8% son proactivas y 30,2% reactivas. Al hacer el procesamiento de datos financieros para los dos grupos, se encontró que el estadístico de asimetría y curtosis para el grupo considerado reactivo evidencia una distribución normal; por el contrario, para el grupo de empresas proactivas la distribución

no es normal, como se presenta en el cuadro resumen de estadísticos descriptivos (Tabla 1) y en las pruebas de normalidad (Tabla 2):

Tabla 1
Estadísticos descriptivos

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Asimetría		Curtosis	
		Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Estadístico	Error estándar	Estadístico	Error estándar
PRO	30	-11,50	786,20	36,3167	143,71119	5,249	,427	28,122	,833
REAC	13	-4,10	16,80	5,6077	6,55496	,093	,616	-,668	1,191
N válido (por lista)	13								

Nota: elaboración propia

Tabla 2
Prueba de normalidad

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	Gl	Sig.	Estadístico	Gl	Sig.
PRO	,511	13	,000	,342	13	,000
REAC	,175	13	,200*	,946	13	,544

Nota: elaboración propia

En razón a que un grupo dio con distribución normal y el otro no, se definió realizar la alternativa no paramétrica U de Mann-Whitney. La prueba arrojó que no se rechaza la hipótesis de que hay igualdad de medias (del ROE) para los dos grupos, lo cual indica que el promedio del ROE para las empresas proactivas no es mayor al de las reactivas, es decir, en este caso, ser una organización proactiva o reactiva no incide en el desempeño financiero de la empresa. Esto se corrobora en la Tabla 3, que muestra los estadísticos de la prueba:

Tabla 3
Estadísticos de prueba

	ROE
U de Mann-Whitney	173,000
W de Wilcoxon	264,000
Z	-,582
Sig. asintótica (bilateral)	,561
Significación exacta [2*(sig. unilateral)]	,574 ^b
b. No corregido para empates.	

Nota: elaboración propia

5. Discusión

Los resultados encontrados sobre la muestra de empresas que aplican estrategias ambientales en Bogotá, evidencia que no hay diferencia en el desempeño financiero entre empresas ambientalmente proactivas, es decir que incorporan en altos porcentajes acciones más allá de lo establecido en la normatividad, y empresas reactivas que, igualmente, aplican estrategias, pero están vinculadas en mayor proporción a la legislación ambiental.

Los estudios previos sobre incidencia de las acciones ambientales en los resultados financieros de las empresas aportan diferentes miradas, pues se han encontrado resultados tanto positivos, como negativos y neutros (P. H. Chen et al., 2016).

Algunos elementos diferenciadores entre este trabajo y otros semejantes que ayudan a explicar parte de los resultados

obtenidos, puede ser el tipo de país. Estudios como el de (Clarkson et al., 2011; Severo et al., 2017), son realizados en países desarrollados o economías grandes (Brasil, Estados Unidos e India, respectivamente) evidencian relación positiva entre desempeño financiero e incorporación de estrategias verdes, o (Ghisetti & Rennings, 2014), realizado en Alemania que, aunque no mostró una relación positiva significativa para todo tipo de estrategia ambiental, sí lo hace evidente para aquellas que reducen el uso de energía y recursos. Otras investigaciones en países emergentes, como Malasia (Nor et al., 2016) muestra una relación no significativa entre desempeño financiero y estrategias ambientales, lo cual concuerda con lo encontrado en el presente trabajo. El grado de desarrollo de un país podría incidir en alguna medida en la presión sobre la legislación ambiental a su vez que en los niveles de exigencia del mercado, lo que podría redundar en desempeños financieros dada una mayor información y exposición de la organización.

Otro aspecto que puede incidir en una relación significativa y positiva entre rendimientos financieros y uso de estrategias ambientales es la visibilidad ante el mercado de dicha información, es decir, que el entorno identifique a la empresa como ambientalmente responsable. (Song et al., 2017) dan cuenta que, para empresas chinas, revelar la información ambiental ante el mercado hace que la organización tenga mejores desempeños en indicadores de rentabilidad; en el caso de las empresas de este estudio, no se preguntó directamente si éstas revelaban información ambiental, sin embargo, la visibilidad de esta información está limitada a la publicación del ecodirectorio de la Secretaría Distrital de Ambiente, lo que podría no ser suficiente para que el mercado identifique la responsabilidad ambiental de estas firmas.

Aun así, cabe resaltar que las entrevistas con los gerentes mostraron que estos consideran que haber iniciado la incorporación de estrategias verdes y tener el aval de una entidad

gubernamental sobre estos procesos, como la Secretaría Distrital de Ambiente, ha significado una ventaja frente a su competencia en particular cuando participan en licitaciones, pues evidenciar responsabilidad ambiental genera puntos adicionales en tales convocatorias.

Por último, podría tener influencia en la relación desempeño financiero y uso de prácticas ambientales más proactivas la temporalidad del uso de estas estrategias. (Leonidou et al., 2015), encontraron que en empresas del sector industrial en Grecia, la adopción de estrategias ambientales puede generar un efecto positivo en los rendimientos financieros a largo plazo. En este sentido, podría pensarse que debido a que las empresas consultadas, en su mayoría, han iniciado la implementación de estrategias ambientales desde la expedición del Decreto 1299 de 2008, todavía no han avanzado lo suficiente en este proceso para que se vea claramente evidenciado en los resultados financieros. Las entrevistas con los gerentes mostraron que una de las mayores dificultades que experimentan las firmas que deciden iniciar un camino verde es el incremento en los costos en el corto plazo, pues ello les implica inversiones en maquinaria y aspectos de la producción; cabe la posibilidad que dichas inversiones aún no hayan presentado el respectivo retorno.

6. Conclusiones

El discurso ambiental en los países en vías de desarrollo como Colombia, aun no es muy fuerte o relevante, ni para productores ni para consumidores. Prueba de esto es el bajo número de empresas que participan de iniciativas gubernamentales para apoyar la incorporación de estrategias verdes, como el PREAD de la Secretaría Distrital de Ambiente. Aun

así, desde la legislación ambiental se han venido estableciendo mecanismos que lleven a incrementar el número de empresas que se decidan por una producción sustentable.

A pesar del compromiso del país ante el llamado de la comunidad internacional por tener mayor regulación que incentive el desarrollo sostenible, en la práctica es poco el control y seguimiento a estos mecanismos, por lo cual puede que las empresas aun no identifiquen del todo los beneficios de tener iniciativa ambiental. Esto dificulta el asunto de diferenciar empresas proactivas de las reactivas.

De acuerdo con el estudio realizado, para el caso de la industria de Bogotá no hay diferencia, en términos de rendimiento financiero, entre empresas ambientalmente proactivas y reactivas, lo cual podría explicarse en alguna medida por el nivel de desarrollo del país y la escasa presión del mercado al respecto, la poca visibilidad de la información sobre responsabilidad ambiental y el tiempo que se lleva aplicando estas estrategias.

Cabe destacar que los resultados de este estudio son limitados y, en consideración a ello, se abren algunas perspectivas para continuar la investigación de este tema. En futuros estudios al respecto, sería interesante considerar la relevancia que tiene la identificación del gerente con los temas ambientales y la tipología de estrategias, en el sentido de si todas aportan de la misma manera a los beneficios de la organización si quizá, algunas tengan mayor incidencia que otras, o si hay diferencia entre sectores económicos, toda vez que el sector estudiado en el presente trabajo fue el industrial, que es uno de los que mayor nivel de inversión requiere al implementar estrategias verdes.

7. Referencias

- Aguilera-Caracuel, J., Hurtado-Torres, N. E., & Aragón-Correa, J. A. (2012). Does international experience help firms to be green? A knowledge-based view of how international experience and organisational learning influence proactive environmental strategies. *International Business Review*, 21(5), 847-861. <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2011.09.009>
- Aragón-Correa, J. A., Hurtado-Torres, N., Sharma, S., & García-Morales, V. J. (2008). Environmental strategy and performance in small firms: A resource-based perspective. *Journal of Environmental Management*, 86(1), 88-103. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.11.022>
- Barbier, E. B., & Markandya, A. (1989). A new blueprint for a green economy. En *A New Blueprint for a Green Economy*. Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203097298>
- Barbier, E. B., & Markandya, A. (2013). A new blueprint for a green economy. En *A New Blueprint for a Green Economy*. Taylor and Francis. <https://doi.org/10.4324/9780203097298>
- Boiral, O., Baron, C., & Gunnlaugson, O. (2014). Environmental Leadership and Consciousness Development: A Case Study Among Canadian SMEs. *Journal of Business Ethics*, 123(3), 363-383. <https://doi.org/10.1007/s10551-013-1845-5>
- Caprotti, F., & Bailey, I. (2014). Making sense of the green economy. *Geografiska Annaler, Series B: Human Geography*, 96(3), 195-200. <https://doi.org/10.1111/geob.12045>
- Chang, C. H., & Chen, Y. S. (2013). Green organizational identity and green innovation. *Management Decision*, 51(5), 1056-1070. <https://doi.org/10.1108/MD-09-2011-0314>
- Chen, P. H., Ong, C. F., & Hsu, S. C. (2016). Understanding the relationships between environmental management practices and financial performances of multinational construction firms. *Journal of Cleaner Production*, 139, 750-

760. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.109>
- Chen, Y. S., & Chang, C. H. (2013). The Determinants of Green Product Development Performance: Green Dynamic Capabilities, Green Transformational Leadership, and Green Creativity. *Journal of Business Ethics*, 116(1), 107-119. <https://doi.org/10.1007/s10551-012-1452-x>
- Clarkson, P. M., Li, Y., Richardson, G. D., & Vasvari, F. P. (2011). Does it really pay to be green? Determinants and consequences of proactive environmental strategies. *Journal of Accounting and Public Policy*, 30(2), 122-144. <https://doi.org/10.1016/j.jaccpubpol.2010.09.013>
- DANE. (2016). *Boletín técnico Encuesta Industrial Ambiental (EAI) 2016*.
- DANE. (2018). *Boletín técnico. Muestra trimestral manufacturera regional*. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/industria/muestra-trimestral-manufacturera-regional>
- Egri, C. P., & Herman, S. (2000). Leadership in the North American Environmental Sector: Values, Leadership Styles, and Contexts of Environmental Leaders and their Organizations. *Academy of Management Journal*, 43(4), 571-604. <https://doi.org/10.5465/1556356>
- Gadenne, D. L., Kennedy, J., & McKeiver, C. (2009). An empirical study of environmental awareness and practices in SMEs. *Journal of Business Ethics*, 84(1), 45-63. <https://doi.org/10.1007/s10551-008-9672-9>
- Ghisetti, C., & Rennings, K. (2014). Environmental innovations and profitability: How does it pay to be green? An empirical analysis on the German innovation survey. *Journal of Cleaner Production*, 75, 106-117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.097>
- González-Benito, J., & González-Benito, Ó. (2006). A review of determinant factors of environmental proactivity. *Business*

- Strategy and the Environment*, 15(2), 87-102. <https://doi.org/10.1002/bse.450>
- Lannelongue, G., Gonzalez-Benito, O., & Gonzalez-Benito, J. (2014). Environmental Motivations: The Pathway to Complete Environmental Management. *Journal of Business Ethics*, 124(1), 135-147. <https://doi.org/10.1007/s10551-013-1854-4>
- Lee, C. H., Wahid, N. A., & Goh, Y. N. (2013). Perceived drivers of green practices adoption: A conceptual framework. *Journal of Applied Business Research*, 29(2), 351-360. <https://doi.org/10.19030/jabr.v29i2.7643>
- Leonidou, L. C., Fotiadis, T. A., Christodoulides, P., Spyropoulou, S., & Katsikeas, C. S. (2015). Environmentally friendly export business strategy: Its determinants and effects on competitive advantage and performance. *International Business Review*, 24(5), 798-811. <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2015.02.001>
- Luan, C. J., Tien, C., & Chen, W. L. (2016). Which «green» is better? An empirical study of the impact of green activities on firm performance. *Asia Pacific Management Review*, 21(2), 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2015.12.001>
- Lucas, M. T., & Noordewier, T. G. (2016). Environmental management practices and firm financial performance: The moderating effect of industry pollution-related factors. *International Journal of Production Economics*, 175, 24-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.02.003>
- Martín-Tapia, I., Aragón-Correa, J. A., & Rueda-Manzanares, A. (2010). Environmental strategy and exports in medium, small and micro-enterprises. *Journal of World Business*, 45(3), 266-275. <https://doi.org/10.1016/j.jwb.2009.09.009>
- Decreto 1299 de 2008, (1 de enero de 2008).
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2013). *INFORME DE GESTIÓN SECTOR AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE-2012*.

- Moini, H., Sorensen, O. J., & Szuchy-Kristiansen, E. (2014). Adoption of green strategy by Danish firms. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 5(2), 197-223. <https://doi.org/10.1108/SAMPJ-01-2013-0003>
- Musvoto, C., Nortje, K., De Wet, B., Mahumani, B. K., & Nahman, A. (2015). Imperatives for an agricultural green economy in South Africa. *South African Journal of Science*, 111(1-2), 01-08. <https://doi.org/10.17159/sajs.2015/20140026>
- Noci, G., & Verganti, R. (1999). Managing 'green' product innovation in small firms. *R&D Management*, 29(1), 3-15. <https://doi.org/10.1111/1467-9310.00112>
- Nor, N. M., Bahari, N. A. S., Adnan, N. A., Kamal, S. M. Q. A. S., & Ali, I. M. (2016). The Effects of Environmental Disclosure on Financial Performance in Malaysia. *Procedia Economics and Finance*, 35, 117-126. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(16\)00016-2](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(16)00016-2)
- ONU. (1991). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. <https://www.un.org/spanish/esa/sustdev/documents/declaracionrio.htm>
- Porter, M. E., & Van Der Linde, C. (2017). Toward a new conception of the environment-competitiveness relationship. En *Corporate Environmental Responsibility* (Vol. 9, Número 4, pp. 61-82). Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1257/jep.9.4.97>
- Programme, U. N. E. (2016). *Resumen de las evaluaciones regionales del sexto informe sobre las perspectivas del medio ambiente mundial GEO-6: Resultados principales y mensajes políticos: UNEP/EA.2/INF/17*. <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/7688>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza,

- R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. En *Nature* (Vol. 461, Número 7263, pp. 472-475). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Sen, P., Roy, M., & Pal, P. (2015). Exploring role of environmental proactivity in financial performance of manufacturing enterprises: A structural modelling approach. *Journal of Cleaner Production*, 108, 583-594. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.076>
- Severo, E. A., Guimarães, J. C. F. de, & Dorion, E. C. H. (2017). Cleaner production and environmental management as sustainable product innovation antecedents: A survey in Brazilian industries. *Journal of Cleaner Production*, 142, 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.090>
- Shahedul Quader, M., Kamal, M. M., & Hassan, A. B. M. E. (2016). Sustainability of positive relationship between environmental performance and profitability of SMEs: A case study in the UK. *Journal of Enterprising Communities*, 10(2), 138-163. <https://doi.org/10.1108/JEC-05-2014-0008>
- Song, H., Zhao, C., & Zeng, J. (2017). Can environmental management improve financial performance: An empirical study of A-shares listed companies in China. *Journal of Cleaner Production*, 141, 1051-1056. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.105>
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. H. (2012). Internationalization and environmentally-related organizational learning among Chinese manufacturers. *Technological Forecasting and Social Change*, 79(1), 142-154. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2011.08.018>

Capítulo 7

Fitorremediación de suelos
contaminados con
cadmio y plomo⁷.

*Phytoremediation of soils
contaminated with
cadmium and lead.*

⁷ Autores: Rebollo Barrios, María Elena, Doria Herrera, Gloria María, Grisales Castañeda, David Santiago. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Medellín, Colombia

RESUMEN

Es de extenso conocimiento la problemática de contaminación a la que se ven sometidos los suelos como consecuencia de la presencia y acumulación de metales pesados como el Cadmio y el Plomo provenientes principalmente de procesos industriales y prácticas agrícolas inadecuadas. Se han implementado técnicas físicas y químicas dirigidas a contrarrestar los efectos negativos generados por dichos metales en el suelo, sin embargo, se ha comprobado que resultan ser costosas y perjudiciales para este. En contraste, la fitorremediación se ha posicionado como una alternativa para el manejo apropiado de este tipo de contaminantes, destacándose por ser económica, ecológica y de fácil ejecución. Se han realizado estudios que desarrollan métodos de fitorremediación enfocados en esta problemática utilizando diferentes especies vegetales, constituyendo una base documental alrededor del tema. Es relevante contar con documentos de revisión que faciliten la identificación y caracterización de factores que determinan el éxito de esta técnica, lo que permitirá el desarrollo de estrategias más efectivas para enfrentar los efectos de la contaminación en el suelo. Así, se realizó una revisión bibliográfica de investigaciones enfocadas en la fitorremediación de suelos afectados por el Cadmio y el Plomo, enfatizando en el reconocimiento de los aspectos clave que componen esta metodología.

Palabras Claves: Fitorremediación, Cadmio, Plomo, Suelos contaminados, plantas hiperacumuladoras, metales tóxicos.

ABSTRACT

The contamination problem to which soils are subjected as a result of the presence and accumulation of heavy metals such as Cadmium and Lead, mainly from industrial processes and inappropriate agricultural practices, is widely known. Physical and chemical techniques have been implemented aimed at counteracting the negative effects generated by these metals

in the soil, however, it has been proven that they turn out to be costly and harmful to it. In contrast, phytoremediation has positioned itself as an alternative for the proper management of this type of pollutant, standing out for being economical, ecological and easy to carry out. Studies have been carried out that develop phytoremediation methods focused on this problem using different plant species, constituting a documentary base around the subject. It is relevant to have review documents that facilitate the identification and characterization of factors that determine the success of this technique, which will allow the development of more effective strategies to face the effects of contamination in the soil. Thus, a bibliographic review of research focused on the phytoremediation of soils affected by Cadmium and Lead was carried out, emphasizing the recognition of the key aspects that make up this methodology.

Keywords: Phytoremediation, Cadmium, Lead, polluted soil, hyperaccumulative plants, toxic metals.

1. Introducción

Una de las principales preocupaciones a nivel ambiental con respecto a la presencia de metales se relaciona con su presencia en matrices complejas, ya que no solo puede afectar ecosistemas, sino que también al ser humano por procesos de biomagnificación.

Dentro de las matrices complejas en la naturaleza, el suelo se destaca por su diversidad de componentes tales como los minerales, provenientes de la roca madre; materia orgánica, la cual está compuesto por la descomposición de material vegetal y descomposición de algunos animales, microorganismos. También tiene propiedades como es la porosidad, en la cual se encuentran partículas donde existe almacenamiento de agua y aire. Gracias a esta diversidad de componentes, el ingreso de los metales es considerado un problema de alto impacto por lo que la materia orgánica presente puede generar complejos (Wright, 2007; Ghosh, 2010 citado por Ali et al., 2013).

Sin embargo, al hablar de contaminación en los suelos, y combinarlo con esa capacidad de absorción, complejación y potencialmente biomagnificación, surge de forma espontánea su correlación con las plantas, ya que existen estudios resaltan la incidencia del Cadmio y el Plomo en procesos metabólicos tales como la fotosíntesis, la asimilación de Nitrógeno y la respiración,

causando a su vez inhibición del crecimiento, patologías como clorosis y necrosis (Kathal et al., 2016) y (Kurepa et al., 1997; Boussama et al., 1999 citados por Sewalem et al., 2014).

Además, cuando ingresa a la planta, genera esa capacidad de persistencia al metal, por lo que se ha podido establecer que el consumo de los alimentos cultivados contaminados con estos metales puede causar graves afecciones sobre la salud humana con consecuencias sobre los sistemas nervioso, inmune y reproductivo (Majer et al., 2002)(Lone et al., (2008) (Kathal et al., 2016) (Fattahi et al., 2019).

Por ello, diversas investigaciones se ha propuesto medidas de mitigación, tal como los señalados por Wuana & Okieimen, (2011) que incluyen la vitrificación, solidificación, estabilización y el lavado, sin embargo, se ha determinado que estas técnicas pueden resultar ser costosas y afectar de manera negativa las propiedades del suelo, generando consecuentemente otros problemas de contaminación asociados a su aplicación.

Gracias a estos hallazgos, se ha planteado estrategias más amigables con el ambiente, dentro de las que se destaca la fitorremediación, la cual se da a través del uso de plantas para inmovilizar, contener y extraer el metal del foco de contaminación al utilizar plantas e impulsada por energía sola, la cual no afecta la calidad del suelo (Moosavi & Seghatoleslami, 2013) (Sabeen et al., 2013)(Laghlimi et al., 2015); no obstante, es importante resaltar que el éxito de estos métodos está determinado por factores como las propiedades fisicoquímicas del suelo, la especie vegetal implementada y la biodisponibilidad del contaminante (Berti and Cunningham, 2000; Sreelal and Jayanthi, 2017, citado por (Cristaldi et al., 2017).

Dado que ciertos metales son considerados necesarios para el suelo, y que en otros son considerados metales contaminantes, esta investigación se enfocó en dos metales que son

considerados contaminantes, dado que no participa en ningún proceso bioquímico del suelo y que su presencia se relaciona con actividades antropogénicas, puntualmente en esta investigación, el enfoque se dio para dos metales: Cadmio y Plomo.

En la actualidad, existe un gran número de estudios enfocados en la fitorremediación de suelos contaminados con Cadmio y Plomo, pero hasta ahora no se ha realizado una revisión sistemática que de cuenta de las condiciones de aplicación de manera crítica y exhaustiva estadísticamente que permita concluir al respecto. Por ello, en la presente investigación y basado en los hallazgos disponibles, se hizo una revisión sistemática de los estudios reportados a la fecha que permitan establecer las mejores condiciones de operación que garanticen el éxito de la fitorremediación para la descontaminación de suelos. Para lograr este objetivo, se hizo revisión exhaustiva de bases de datos, construcción de ecuación bibliométrica, proceso inclusión/exclusión de artículos, rúbrica de puntuación basado en PRISMA, análisis estadístico de las referencias seleccionadas y finalmente, las conclusiones de las condiciones de operación.

2. Metodología

Análisis de la búsqueda bibliográfica y construcción de la ecuación bibliométrica.

Para la ejecución de esta revisión se tomó como fundamento la metodología propuesta por Gómez-Luna et al., (2014) compuesta por 4 fases : definición del problema , búsqueda de información, organización de la información y análisis. En la figura 1, se evidencia la trazabilidad metodológica para la realización de dicha investigación.

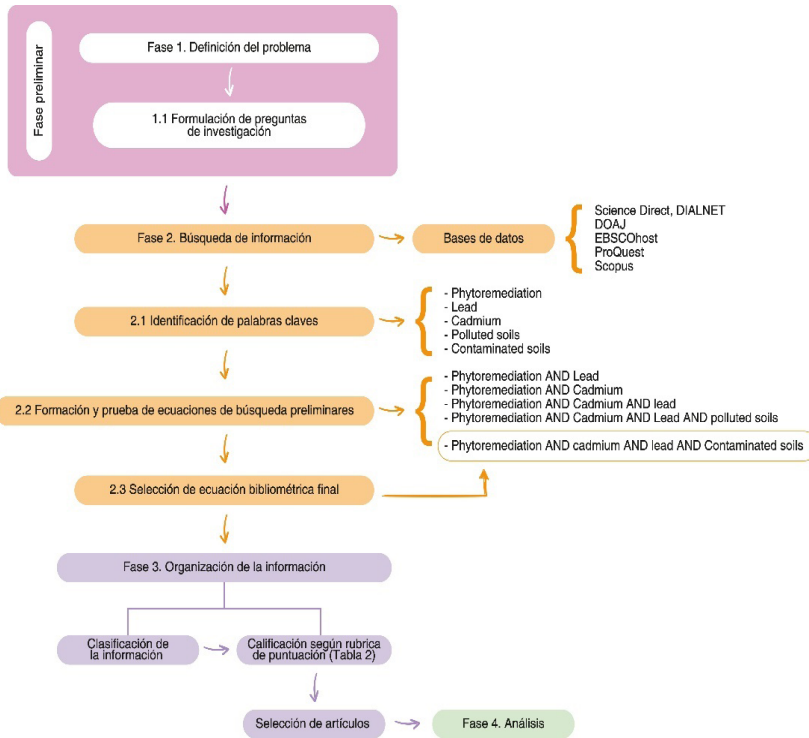


Figura 1. Esquema metodológico. Fuente: Autoría propia

Fase 1. Definición del problema: se desarrolló de forma preliminar partiendo de la necesidad de contar con un documento que sintetizara los procesos y avances relacionados con la aplicación de la fitorremediación en el tratamiento de suelos contaminados con Cadmio y Plomo. De esta forma, teniendo en cuenta las bases teóricas y estudios de caso previamente revisados, se formuló la respectiva pregunta de investigación bajo esta condición se condujo la revisión. En este proceso también fueron evaluadas las metodologías aplicables a la óptima búsqueda, selección y análisis de los artículos base.

Fase 2. Búsqueda de información: ara el desarrollo de esta fase se hizo un análisis de los siguientes aspectos:

Identificación de palabras claves, una vez planteadas las preguntas de investigación, se realizó una exploración inicial de información en diferentes buscadores y bases de datos, con el fin de determinar la existencia y disponibilidad de documentos alusivos al tema. A través de este proceso se identificaron las siguientes palabras claves: **“Phytoremediation”, “Lead (Pb)”, “Cadmium (Cd)”, “Polluted soils” y “Contaminated soils”**.

Selección de bases de datos o portales de búsqueda, con base en la búsqueda preliminar de información realizada en el paso anterior, se determinaron las bases de datos documentales y plataformas de búsqueda a implementar como fuente bibliográfica. Para esto, se tuvo en cuenta factores como la condición multidisciplinar de las bases y portales consultados, la cantidad de documentos obtenida tras ingresar las palabras claves y la accesibilidad. De esta forma, fueron seleccionadas 6 fuentes de información: Dialnet, DOAJ, Science Direct, Scopus, EBSCOhost y Proquest, 2 de ellas con acceso libre (Dialnet y DOAJ) y 4 con acceso limitado, a las cuales fue posible ingresar a través de la biblioteca virtual de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Elaboración de la ecuación bibliométrica, tomando como referencia las palabras claves previamente definidas, se realizó diferentes combinaciones con el fin de determinar la ecuación bibliométrica óptima en relación con el ajuste de los artículos obtenidos en cada base de datos respecto al tema estudiado.

Fase 3. Organización de la información. Para la organización de la información se procedió a realizar el proceso de clasificación, tomando como fundamento los aspectos operativos resumidos en la figura 2.

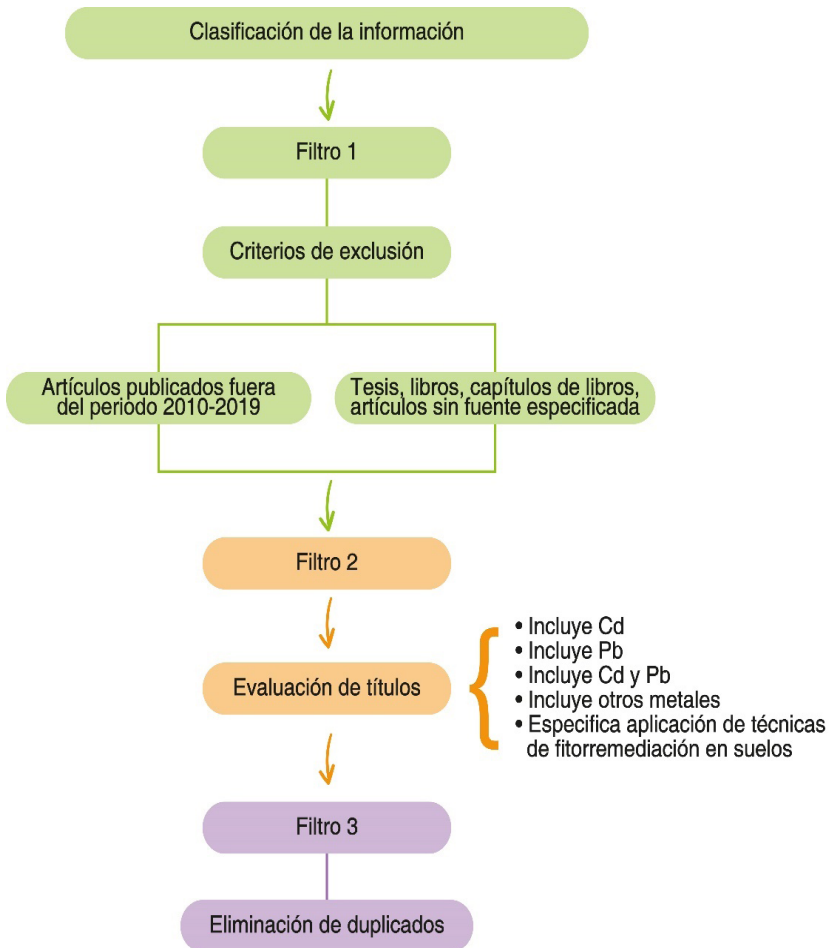


Figura 2. Esquema metodológico para clasificación de la información.
Fuente: Autoría propia

Criterios de inclusión y exclusión, con el propósito de depurar el número de artículos obtenido fueron aplicados dos criterios de exclusión relacionados con la fecha de publicación y la fuente de origen, de esta manera, se ejecutó un filtro de búsqueda limitado a los documentos publicados en el periodo 2010 – 2019 referentes a revisiones e investigaciones, excluyendo aquellos correspondientes a libros o capítulos de libros, tesis académicas

e información sin fuente especificada. Sobre los artículos resultantes se realizó una evaluación general del título, con el fin de determinar la pertinencia respecto al tema estudiado, finalmente se verificó la existencia de artículos duplicados en las bases de datos y portales de búsqueda consultados.

Calificación de la información y selección de artículos, para este proceso se tomó como referencia la lista de comprobación asociada a la declaración PRISMA (Moher et al., 2014), a partir de la cual, fue diseñada una tabla de calificación correspondiente al anexo 4.1, en la que fueron abarcados 3 de los 27 ítems propuestos en la declaración: título, métodos y conclusiones, adicionalmente se incluyó el ítem fuente como criterio a revisar. Además, se tuvieron en cuenta aspectos de contenido relevantes para la revisión tales como, si el artículo contempló dentro de la investigación los metales de manera individual, si en efecto se estudiaron ambos metales, o si la técnica de fitorremediación fue evaluada con otros metales. El proceso de calificación se desarrolló bajo un rango de 1 a 5, estableciendo una puntuación acumulada mínima de 35. Los artículos con esta condición fueron almacenados utilizando el software de gestión biblioFigura Mendeley para finalmente ser utilizados en el proceso de revisión y análisis.

Fase 4. Análisis. Para este proceso se realizó la lectura de los artículos seleccionados, asociando las metodologías y resultados de cada caso con los fundamentos teóricos previamente revisados. De esta manera, bajo el contexto de los componentes que constituyen un proceso de fitorremediación tradicional, se realizó el análisis de aspectos como las características del suelo, las especies de plantas utilizadas y el comportamiento de estas en los diferentes procesos ejecutados. El análisis desarrollado además de basarse en fundamentos teóricos cuenta con el análisis estadístico derivado del metaanálisis de las variables extraídas de cada artículo.

El proceso de análisis se realizó con base en tres aspectos: las propiedades del suelo, el tipo de especies de plantas implementadas y la eficiencia de las mismas en la remediación de suelos contaminados con Cadmio y Plomo, aspectos reportados por diferentes autores como tres de los factores operativos de mayor relevancia en la ejecución de métodos de fitorremediación. En los artículos revisados, estos factores son estudiados a partir de la determinación de variables como el pH del suelo, el factor de bioconcentración (BCF), el factor de transferencia (TF), la eficiencia en la producción de biomasa y la concentración final de cada metal en las plantas. Por lo tanto, con el fin de analizar y comparar los resultados reportados por cada autor, se diseñó una matriz de metadatos, en la cual fueron registrados los valores reportados para cada variable en los diferentes artículos revisados, haciendo una diferenciación por artículo, especie vegetal y metal tratado. Cabe resaltar que para el caso de las variables relacionadas con la concentración de metal inicial o final se encontraron valores en diferentes unidades, por lo que se determinó tomar como única unidad las partes por millón (ppm), por ende, para los valores en unidades diferentes a esta se realizó la respectiva conversión. Así mismo, para el caso de los valores de biomasa se tomó como única unidad gramos (g), por ello, al igual que en el caso anterior se realizaron las conversiones pertinentes.

Una vez diligenciada la matriz de metadatos se desarrolló el análisis estadístico utilizando herramientas Figuras como “*Box plots*” construidos en el software “RStudio”, a través de los cuales fue posible comparar el comportamiento presentado por las diferentes variables frente a cada metal, analizar la distribución y dispersión de los datos y en algunos casos determinar los valores atípicos. Finalmente, se realizó la interpretación y análisis de las Figuras resultantes, contextualizando los resultados obtenidos con las bases teóricas y estudios de caso revisados.

3. Análisis de resultados

Determinación de la ecuación bibliométrica

Inicialmente, se plantearon dos preguntas de investigación, la primera asociada a la temática a revisar respecto a la cual se estableció el siguiente interrogante ¿Es posible establecer que la fitorremediación es una buena *metodología para el tratamiento y remoción de Cadmio y Plomo en suelos*?

Asimismo, tras considerar las diversas metodologías de revisión bibliométrica disponibles, se determinó viable ejecutar una revisión sistemática, de este modo se planteó como segunda pregunta de investigación: *¿es posible que las herramientas de la revisión sistemática sean eficientes para lograr establecer criterios de calidad de los artículos consultados?*

Gracias a estos cuestionamientos, se realizó la búsqueda de información, la cual consistió en el análisis de la información obtenida a través de las fuentes de información previamente descritas, los resultados de dichas búsquedas se muestran en la figura 3, en la que es posible establecer que SCOPUS brindó mayor cantidad de información disponible con un total de 79658 documentos, seguida por Proquest y Science Direct con 32203 y 14870 documentos respectivamente. Cabe destacar que siendo SCOPUS siendo un metabuscador, incluye varios de los hallazgos reportados por la base de datos Science Direct.

Por otra parte, la menor cantidad de información resultante se obtuvo en Dialnet con un total de 39 artículos, considerado bastante inferior en comparación con el arrojado por las otras fuentes de información, no obstante es importante considerar que Dialnet es una base de datos que prioriza el contenido enfocado en las ciencias humanas, jurídicas y Sociales, razón por la cual los artículos asociados a temáticas como la fitorremediación en otros idiomas son limitados.

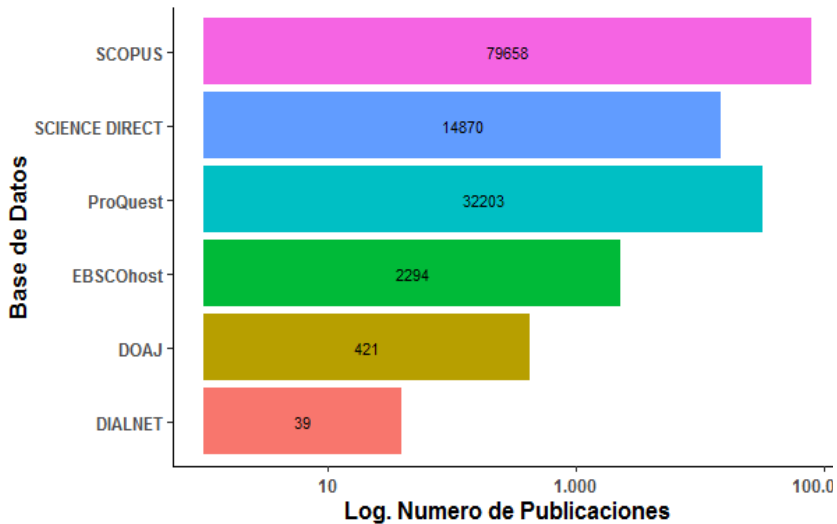


Figura 3. Relación del número de publicaciones obtenida respecto a las bases de datos y portales de búsqueda seleccionados Fuente: Autoría propia

Seguidamente, para la construcción de la ecuación bibliométrica, se propuso 5 ecuaciones teniendo en cuenta los patrones de consulta en las bases de datos, para ello se utilizó el operador booleano “**AND**” en conjunto con los términos recurrentes en la literatura revisada previamente, las ecuaciones bibliométricas propuestas fueron:

1. Phytoremediation AND Lead
2. Phytoremediation AND Cadmium
3. Phytoremediation AND Cadmium AND Lead
4. Phytoremediation AND Cadmium AND Lead AND polluted soils
5. Phytoremediation AND Cadmium AND Lead AND contaminated soils

Para establecer cual era la ecuación bibliométrica optima, analizado en la figura 4, se realizó los patrones de consulta en las bases de datos y al analizar criterios de calidad de los documentos

encontrados se pudo establecer la ecuación bibliométrica, la cual se define:

Ecuación bibliométrica: **A And B And C And E**

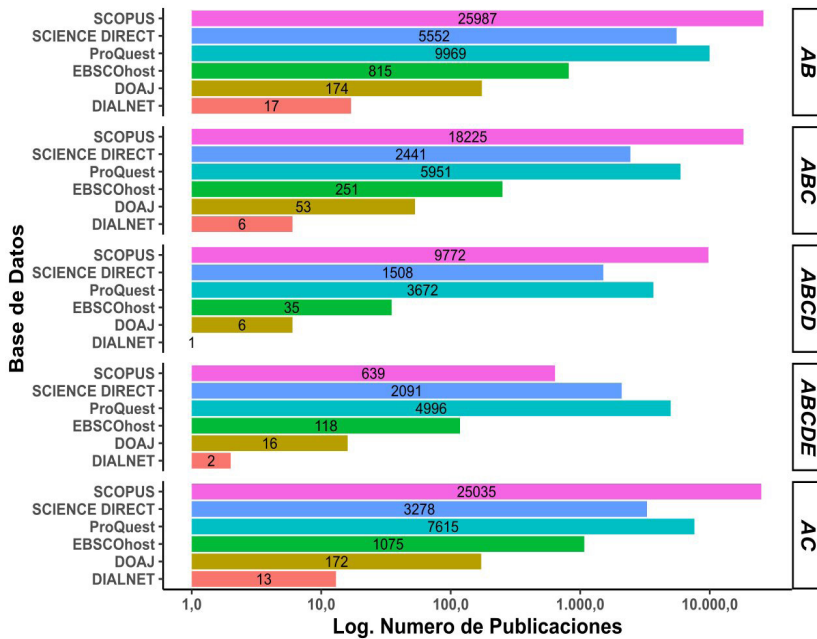


Figura 4. Número de publicaciones reportadas por cada fuente de información en relación a las ecuaciones de búsqueda predefinidas donde: A es “*phytoremediation*”, B es “*Lead*”, C es “*Cadmium*”, D es “*polluted soils*” y E es “*Contaminated soils*”. Fuente: Autoría propia

Finalmente, tras realizar la revisión general de los títulos e identificar y eliminar fuentes duplicados se obtuvo un total de 152 documentos, distribuidos en las diferentes fuentes de información implementadas tal como se muestra en la figura 5. Es importante resaltar de manera reiterada, que aunque SCOPUS es un metabuscador, de diferentes bases de datos, la especificidad y áreas de conocimiento en la que se especialice la base de datos genera un factor diferencial en la calidad de los artículos encontrados.

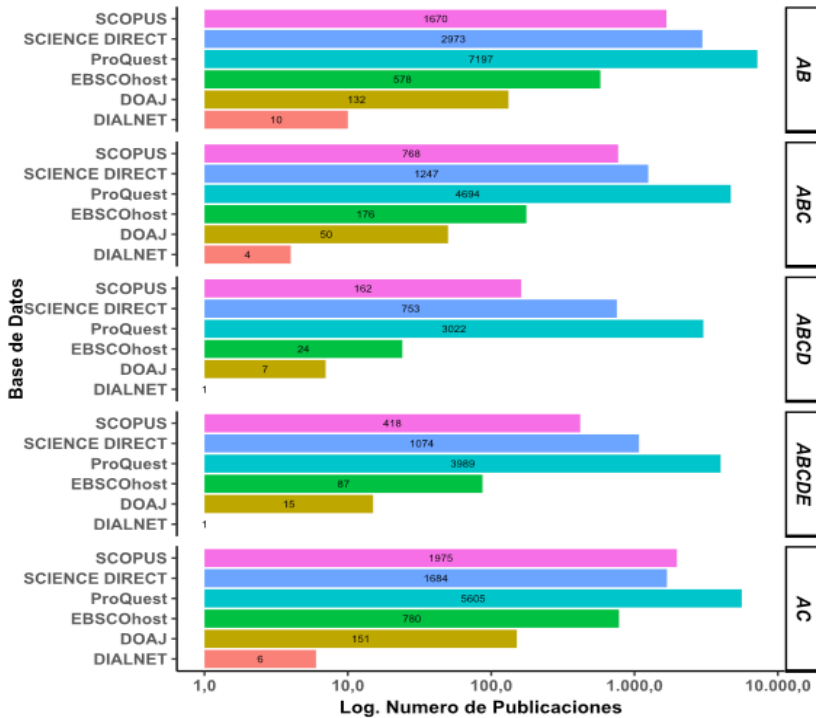


Figura 5. Número de artículos resultante de la aplicación de los filtros de exclusión, por cada fuente de información en relación con las ecuaciones de búsqueda predefinidas, donde: A es “*phytoremediation*”, B es “*Lead*”, C es “*Cadmium*”, D es “*polluted soils*” y E es “*Contaminated soils*”. Fuente: Autoría propia

Luego, se aplicó la lista de comprobación asociada a la declaración PRISMA, la cual fue elaborada teniendo en cuenta criterios mínimos de calidad para un documento publicados en medios científicos especializados, de los 152 documentos preseleccionados, 26 que cumplieron con los requerimientos de información considerados necesarios para el análisis. La calificación de los artículos finales según la rúbrica propuesta se encuentra en el anexo 2, en la cual se identificó un rango de puntuaciones entre 35 y 43.

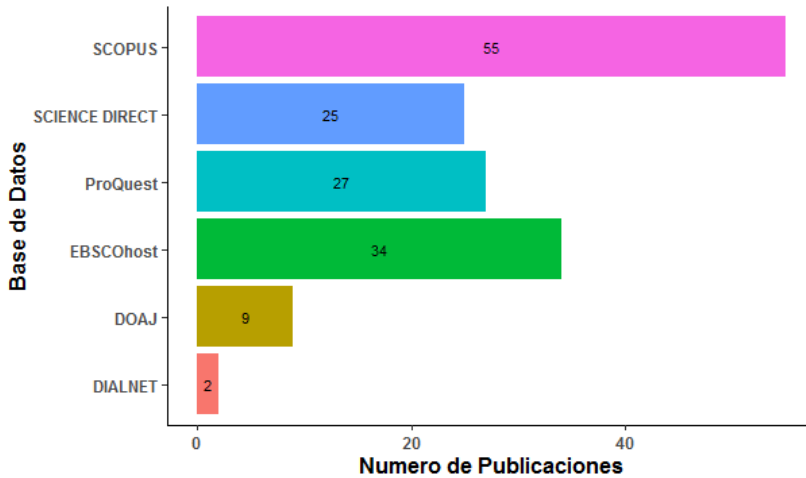


Figura 6. Total, de artículos pre-seleccionados como resultado de la aplicación de los filtros 2 y 3. Fuente: Autoría propia

La puntuación máxima la presentó el artículo correspondiente a la investigación “*Phytoextraction of cadmium and lead by three vegetable-crop plants*” desarrollada por S. Y. Ali et al., (2016), la cual fue puntuada con el valor máximo establecido en la mayoría de ítems propuestos. En contraste, 10 de los artículos seleccionados presentaron la calificación mínima determinada, dado que no contaban con información completa relacionada con alguna de las variables de interés como la biomasa, el factor de bioconcentración (BCF) o el factor de transferencia (TF). De igual manera, es necesario señalar que 3 de los artículos incluidos obtuvieron un puntaje de 34, sin embargo, se definieron como excepción al puntaje y fueron tenidos en cuenta en el análisis ya que se consideró que su contenido podría aportar en el mismo.

Variables significativas en el proceso de fitorremediación

Tal como se muestra en la figura 7 se dan distintos procesos que se asocian a la fitorremediación, en primera instancia, el suelo

actúa como reserva de metales biodisponibles y de nutrientes para las plantas, en este caso, los metales son tomados por las raíces y acumulados en los tejidos por fitoestabilización o transportados a las partes superficiales de la planta a través de los vasos del xilema, vía apoplasto o simplasto (fitoextracción) (Sarwar et al., 2017).

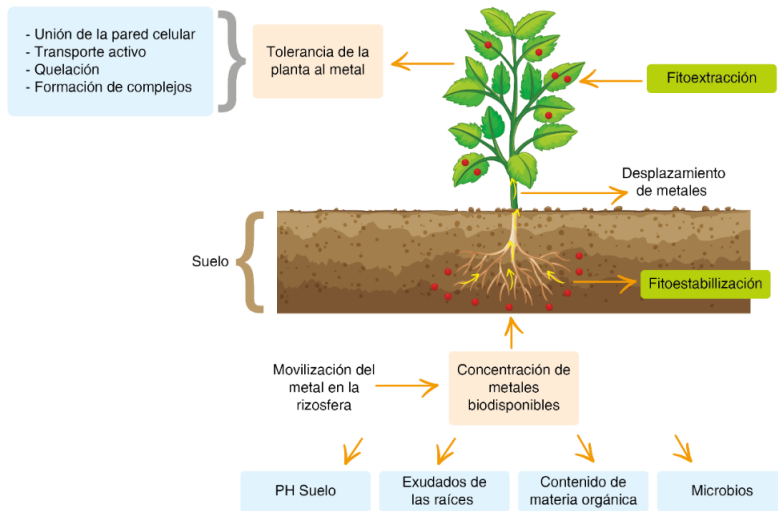


Figura 7. Componentes y procesos que constituyen un proceso de fitorremediación de metales pesados. Fuente: Adaptado de Sarwar et al., (2017)

Teniendo en cuenta lo anterior, en el proceso de fitorremediación de metales pesados pueden estar biodisponibilidad o fitodisponibilidad, es decir, la fracción presente en el suelo de dichos contaminantes que puede ser absorbida por los organismos vivos (Laghlimi et al., 2015; Semple et al., 2003). A su vez, esa biodisponibilidad está sujeta a diferentes factores tales como el pH, textura, contenido de materia orgánica, propiedades del metal, especie de planta utilizada en el proceso, entre otras (Laghlimi et al., 2015; Peijnenburg & Jager, 2003).

Además, existen otras propiedades del suelo que generan un efecto significativo adicional, en el proceso, como: el pH , la capacidad de intercambio catiónico , el contenido de materia orgánica, el contenido de arcilla y el potencial redox, son algunos de los factores que influyen en la forma del metal contaminante y en su movilidad, afectando la disponibilidad de este para ser captado por la plantas (McIntyre, 2003; Gerber et al., 1991 citado por Evanko & Dzombak, 1997).

Debido a la complejidad de la matriz de estudio y de la misma especiación de los metales en el suelo, en esta investigación se realizó un análisis de los resultados reportados en distintas investigaciones que permitan establecer las condiciones optimas para la puesta en marcha de la tecnología basados en la literatura de consulta.

Inicialmente, el pH se ha identificado como la variable con mayor influencia en la solubilidad y disponibilidad de los metales pesados en el suelo, es así como los bajos niveles de pH pueden producir un incremento en la concentración de dichos elementos al disminuir su adsorción, puede consecuentemente aumentar la disponibilidad del metal para ser tomado por las plantas, no obstante, existen riesgos de generar mayor toxicidad sobre las mismas debido a las altas concentraciones a las que son expuestas (Bhargava et al., 2012). Por otra parte, el aumento del pH puede provocar una mayor adsorción de elementos como el Cadmio a las partículas del suelo reduciendo la absorción por las plantas (Kuo et al. 1985 citado por Saxena et al., 1999), las razones asociadas a este fenomeno se relaciona precipitación de hidróxidos insolubles, carbonatos y complejos orgánicos (Somasundaram et al., 2006) o en el caso del Plomo, se hidrolize formando hidroxí-compuestos, de esta forma, el hidroxido de plomo formado el $Pb(OH)_2$ (Isaura, 2010).

En la figura 8, se muestra el comportamiento de la variable pH registrada en los articulos seleccionados para ambos metales, en

la cual se evidencia que el 50% de los valores de pH reportados se encuentra en un rango de 6.46 a 7.07.

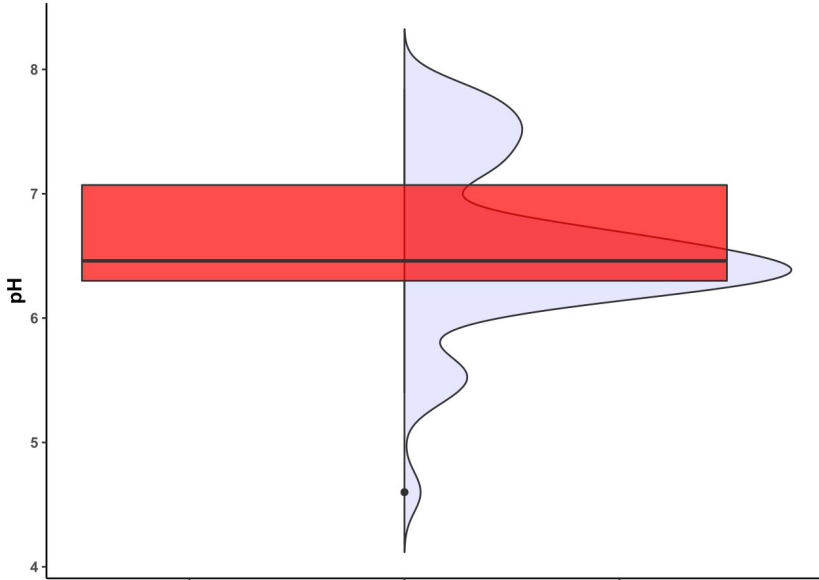


Figura 8. Box plot correspondiente a los valores de pH reportados a nivel general en cada experimento agrupando los valores señalados para los dos metales y para los grupos control. Fuente: Elaboración propia

Frente a esta tendencia cabe destacar lo mencionado por Sauvé et al., (1997) citado en su investigación por Isaura, (2010), quienes indican que a pH cercanos a los niveles neutros, la solubilidad del Plomo aumenta cuando el contenido en el suelo supera los $1000 \text{ mg Pb kg}^{-1}$, de igual manera, se determinó que a pH altos entre 7 y 8 el Pb^{+2} soluble se encuentra en concentraciones más bajas en comparación con pH inferiores a 7 .

Además, se muestra un valor de 4.6 señalado como atípico en comparación con los valores de pH reportados en la mayoría de artículos. Este valor corresponde a un promedio entre el rango de pH indicado por Majid et al., (2012) para el suelo antes de la plantación de las plántulas de la especie *Dyera costulata*

analizadas. Según Majid et al., (2012) este valor aumentó en el suelo del medio de crecimiento para los 5 tratamientos implementados (25ppm Cd, 50 ppm Cd, 75 ppm Cd, 100 ppm Cd y 150 ppm Cd) en dicha investigación al momento de la cosecha de las plántulas, de acuerdo al autor el aumento en los niveles de pH pudo deberse a la absorción de metales pesados en el suelo contaminado. Asimismo, en este estudio los autores reportaron la disminución en la concentración de Cadmio en las plántulas después de la cosecha de estas para todos los tratamientos, lo que fue atribuido al efecto de las altas concentraciones de éste en el medio sobre el crecimiento de las plantas y por tanto en la absorción del metal. Este aspecto según Guttormsen et al. (1995) se presenta en suelos con valores bajos de pH en los que el Cadmio disponible para ser captado por las plantas resulta toxico para las mismas.

Nascimento et al., (2016) evaluaron en su investigación el posible aumento en la fitoextracción de Plomo de las especies *Vetiveria zizanioides L.*, *Helianthus annuus L.*, *Ricinus communis L.*, y *Zea mays L.*, aplicando correcciones en la acidez del suelo. La caracterización química del suelo implementado arrojó un pH de 3.63 donde se identificó una alta influencia de la acidez en el crecimiento de las plantas, aspecto que se vio contrastado por los efectos de la corrección del pH por encalado en las variables de crecimiento analizadas, obteniendo en el caso de la especie *Vetiveria zizanioides L.* mayor número de hojas y mayor área foliar. Asimismo, para la especie *Zea mays L.*, la corrección del pH benefició el crecimiento de los individuos, influyendo en variables como la altura, diámetros y área foliar. Por otro lado, las especies *Ricinus communis L.* y *Helianthus annuus L.* demostraron mayor afectación incluso con la corrección de pH, exhibiendo menor producción de biomasa. No obstante, para las 4 especies analizadas Nascimento et al., (2016) señala que la corrección de pH no influyó la transferencia del metal de raíces a brotes, la cual fue inferior al 40%. Los autores de esta investigación atribuyeron lo anterior a las restricciones de movimiento del Plomo debido a su retención con los grupos carboxilo de los ácidos galacturónico y glucorónico de la pared celular.

Como conclusión preliminar para esta variable, se identificó que la mayoría de valores de pH reportados en los diferentes estudios para los dos metales se encuentra entre 6 y 7, sin embargo, estos valores deben analizarse en conjunto con otras propiedades químicas y físicas del suelo, ya que por ejemplo en el caso del Cadmio además del pH los procesos de sorción de este metal pueden afectarse por factores como la presencia de sedimentos, materia orgánica, y minerales carbonatados, asimismo respecto al Plomo deben considerarse aspectos como el intercambio de iones y la formación de complejos con la materia orgánica (Evanko & Dzombak, 1997).

Luego, al revisar el efecto de la especie de planta seleccionada en el proceso de fitorremediación, para el tratamiento de suelos contaminados con metales se destaca el uso de plantas metalofitas, (Sarma, 2011) Sheoran et al., (2011) a través de mecanismos biológicos pueden restringir, tolerar o desarrollarse en suelos ricos en metales pesados.

En este contexto, las plantas se clasifican a su vez en tres grupos, las de tipo excluyente, caracterizadas por acumular en las raíces los metales presentes en el substrato limitando el transporte de estos hacia tallos y hojas; las indicadoras, que como denota su nombre reflejan la concentración de metales en el suelo acumulándolos en las partes superficiales de la planta (Sheoran et al., 2011) y finalmente las hiperacumuladoras, capaces de retener metales en niveles que exceden 100 veces los presentados por otras plantas, resultando ampliamente útiles para la fitoextracción (Wuana & Okieimen, 2011).

En términos generales, existen reportes de alrededor de 750 plantas terrestres y acuáticas aplicables en procesos de fitorremediación, en el caso de las plantas hiperacumuladoras, diferentes autores señalan la existencia de más de 500 especies distribuidas en 101 familias, en las que sobresalen *Brassicaceae*, *Asteraceae*, *Poaceae*, *Euphorbiaceae*, *Fabaceae*, *Caryophyllaceae*,

Cyperaceae, Cunoniaceae, Flacourtiaceae, Lamiaceae y Violaceae (Sarma, 2011).

Teniendo en cuenta lo anterior, gran parte de los artículos de revisión e investigación relacionados con el tema, se enfocan en desarrollar ensayos tanto en ambientes controlados como en campo, destinados a evaluar el potencial de determinadas especies para extraer o estabilizar metales, probar la efectividad de algunas especies identificadas como hiperacumuladoras bajo diversas condiciones o valorar los efectos de ciertos metales en el desarrollo de las plantas. En la Tabla 1, se presenta el listado de las especies de plantas con su correspondiente familia, trabajadas por diferentes autores en la remediación de suelos contaminados con cadmio y plomo implementando técnicas como fitoextracción y fitoestabilización, incluidas en los artículos revisados en la cual, se destacar la aplicabilidad de especies de las familias *Poaceae, Asteraceae y Brassicaceae*, en procesos de fitorremediación:-

Seguidamente, autores como Kärenlampi et al., (2000) mencionan algunas características con las que deben contar las plantas para ser implementadas en la fitorremediación de suelos contaminados con metales, resaltando la capacidad de acumular el metal extraído en las partes superficiales (aunque las plantas que no presentan esta característica pueden ser utilizadas en procesos de fitoestabilización), tolerancia a las concentraciones del metal acumulado, rápido crecimiento, generación de biomasa altamente efectiva y ser fáciles de cosechar. Del mismo modo, Ahmadpour et al., (2012), señala una serie de criterios a tener en cuenta en la selección de plantas hiperacumuladoras en los que incluyen: capacidad de acumulación, eficiencia en la remoción, factor de bioconcentración (BCF) y factor de transferencia (TF).

Tabla 1. Listado de especies vegetales implementadas en procesos de fitorremediación de Cadmio y Plomo identificadas en los artículos revisados

Espece	Familia	Fuente de consulta
<i>Abutilon theophrasti</i>	Malvaceae	Hammami et al., 2016
<i>Amaranthus Caudatus L</i>	Amaranthaceae	Bosiacki et al., 2013
<i>Athyrium wardii</i>	Woodsiaceae	Zhan et al., 2018
<i>Atriplex lentiformis</i>	Chenopodiaceae	Eissa, 2017
<i>Beta vulgaris L. var. Cicla</i>	Chenopodiaceae	Song et al., 2012
<i>Brassica juncea (L.) Brassicaceae</i>		Zaurov et al., 1999
<i>Cassia alata</i>	Caesalpiniaceae	Silva et al., 2017
<i>Coronopus didymus</i>	Brassicaceae	Preet et al., 2018
<i>Datura stramonium L</i>	Solanaceae	Shirkhani et al., 2018
<i>Dyera costulata</i>	Apocynaceae	Majid et al., 2012
<i>Festuca rubra</i>	Poaceae	Korzeniowska & Gołda, 2016
<i>Helianthus annuus</i>	Asteraceae	Nascimento et al., 2016
<i>Helianthus tuberosus L.</i>	Asteraceae	Long et al., 2013
<i>Lolium multiflorum</i>	Poaceae	Salama et al., 2016
<i>Lolium perenne L.</i>	Poaceae	Y. Zhang et al., 2019
<i>Medicago sativa L</i>	Fabaceae	Elouear et al., 2016
<i>Momordica charantia</i>	Cucurbitaceae	S. Y. Ali et al., 2016
<i>Ocimum gratissimum L.</i>	Lamiaceae	Khonsue, 2015
<i>Poa pratensis</i>	Poaceae	Korzeniowska & Gołda, 2016
<i>Populus alba (L.)</i>	Salicaceae	Alizadeh et al., 2012
<i>Populus nigra L .</i>	Salicaceae	Radojčić Redovniković et al., 2017
<i>Portulaca oleracea</i>	Portulacaceae	Hammami et al., 2016
<i>Prosopis juliflora (Sw .)</i>	Mimosaceae	Varun et al., 2011
<i>Pterocypsela laciniata</i>	Asteraceae	Zhong et al., 2019
<i>Ricinus communis L.</i>	Euphorbiaceae	Bosiacki et al., (2013), H. Zhang et al., 2016, Nascimento et al., 2016
<i>Rorippa globosa (Turcz.) Thell.</i>	Brassicaceae	Sun et al., 2010
<i>Rorippa islandica</i>	Brassicaceae	Sun et al., 2010

<i>Salix mucronata</i>	<i>Salicaceae</i>	El-Mahrouk et al., 2019
<i>Solanum melongena</i>	<i>Solanaceae</i>	S. Y. Ali et al., 2016
<i>Solanum nigrum</i>	<i>Solanaceae</i>	Hammami et al., 2016
<i>Sorghum bicolor</i>	<i>Poaceae</i>	Wang et al., 2017
<i>Taraxacum officinal</i>	<i>Asteraceae</i>	Hammami et al., 2016
<i>Vetiveria zizanioides</i>	<i>Poaceae</i>	Nascimento et al., (2016)
<i>Vigna unguiculata</i>	<i>Fabaceae</i>	S. Y. Ali et al., 2016
<i>Washingtonia filifera</i>	<i>Arecaceae</i>	Mahdavi & Kherman-dar, 2018
<i>Zea mays</i>	<i>Poaceae</i>	Nascimento et al., (2016)

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, se encontró otro aspecto importante en el proceso que es la capacidad de acumulación, la cual se define como la habilidad natural de las plantas para acumular metales en sus partes superficiales. En el caso de plantas hiperacumuladoras se habla de una capacidad de acumulación de 100 ppm para Cadmio y 1000 ppm para Pb (Lasat, 1999) Ahmadpour et al., (2012).

En la figura 9, a través del análisis de los boxplot los diferentes valores de concentración de Cadmio y Plomo encontrados en plantas dentro del proceso de fitorremediación, comparadas con una planta que no posee efectos del metal denominada control o placebo. Dentro del análisis realizado por los investigadores, se observó que las concentraciones de metal en las plantas control, presentando incluso valores mínimos que no alcanzan a representar 1ppm del metal. Una vez aplicados los diferentes tratamientos de Cadmio y Plomo, se notó que las concentraciones de cada metal en las plantas incrementaron, un claro ejemplo de este efecto, fue lo sucedido con la especie *Rorippa globosa* reportada por Sun et al., (2010), se evidenció que la acumulación de Cadmio en las hojas de los individuos tratados con 10 ppm y 25 ppm fue de 120.5 ppm y 218.9 ppm respectivamente, superando el umbral de 100 ppm establecido para las plantas hiperacumuladoras.

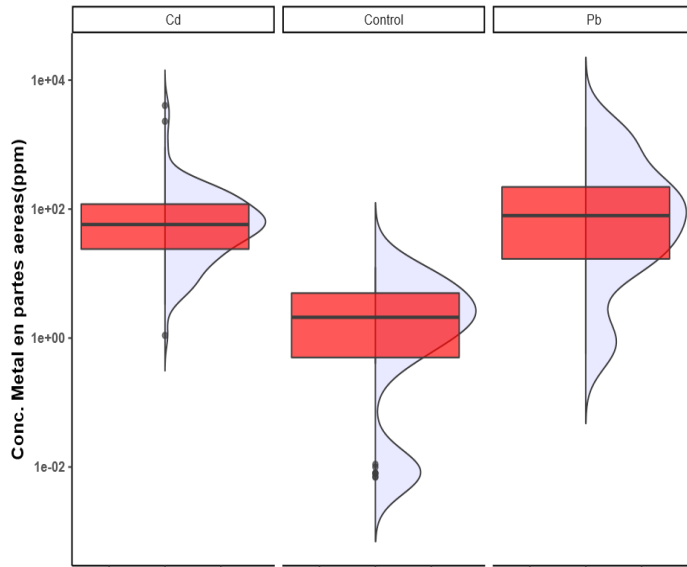


Figura 9. Box plot correspondiente a la variable “Concentración de metal en partes aéreas” diferenciada para las plantas tratadas con Cadmio y Plomo con respecto a las las plantas control. Fuente: Elaboración propia

Otro ejemplo a resaltar corresponde a la investigación desarrollada por Zhong et al., (2019), cuyos resultados indica que en suelos contaminados bajo concentraciones de Cadmio de 50 ppm la concentración del metal en los brotes de los individuos de la especie *Pterocypsela laciniata* fue de 116 ppm, superando el valor crítico de 100 ppm antes mencionado. Igualmente, se determinó que la concentración de Cadmio en raíces y brotes aumentó con el incremento en la concentración del metal en el suelo, para este caso se manejaron tratamientos de 5, 10, 25, 50, 75 y 100 ppm: Cabe señalar, que este último aspecto en el cual la captación y acumulación del metal aumentó proporcionalmente a la concentración del contaminante en el suelo, fue reportado en varias de las investigaciones revisadas para los dos metales.

De igual forma, en la figura 10 se muestra la distribución de la concentración de Cadmio y Pb en las raíces de las plantas

analizadas bajo la acción de los dos metales con relación a las plantas control. En el análisis del boxplot para el Plomo, se observó una mayor dispersión de datos y por ende mayor variabilidad de los mismos, posiblemente como resultado del menor número de datos encontrados en la literatura consultada para este metal. Así mismo, se observa que el valor medio, en este caso la mediana, correspondiente a las concentraciones de Plomo en las raíces es mayor en comparación con el valor medio identificado para este mismo metal en las partes aéreas de las plantas, lo anterior coincide con la tendencia presentada en la mayoría de concentraciones reportadas, en las cuales se presentaron mayores valores de Plomo en las raíces que en los órganos superficiales. Esta situación es mencionada por Hassan et al., (2015) quienes referencian en su investigación que los individuos de las especies *Sinapis arvensis* y *Rapistrum rugosum* evaluados presentaron dicho comportamiento bajo las 5 concentraciones trabajadas (100-500 ppm) aumentando de forma lineal con el incremento en la concentración del metal en el suelo en 100ppm. En este contexto, según Hassan et al., (2015) citando a Pourrut et al. (2011) y Gupta et al. (2013) gran parte del Plomo absorbido por las plantas es retenido en las raíces sin llegar a los tejidos vasculares, aspecto que según el mismo autor puede deberse a que el Plomo es un metal pesado de alta masa atómica por lo que su movilidad en las células de las plantas es baja.

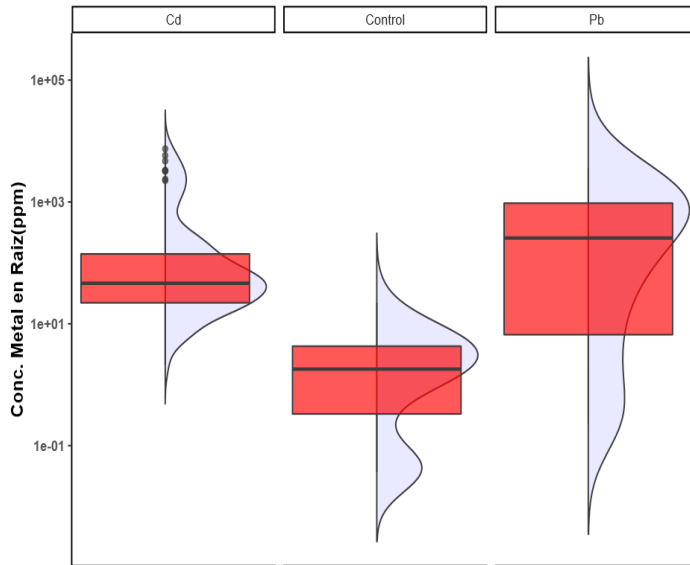


Figura 10. Box plot correspondiente a la variable “Concentración de metal en raíces” diferenciada para las plantas tratadas con Cadmio y Plomo con respecto a las plantas control. Fuente: Elaboración propia

Luego, al hablar de la tasa de remoción de metales en suelos contaminados depende de la biomasa recolectada y de la concentración del metal en dicha biomasa Lasat, (1999). Las plantas hiperacumuladoras, por ejemplo, tienen la habilidad natural de acumular metales pesados en las partes superficiales, sin embargo, su biomasa disminuye cuando absorben altos niveles de este tipo de contaminantes, lo que implica que la masa total de los metales removidos tienda a ser baja. (Ghori et al., 2016; Rock et al., 2000).

Seguidamente, Korzeniowska & Gołda, (2016) desarrolló una investigación encaminada a comparar la tolerancia al Cadmio de 3 especies de hierbas *Poa pratensis*, *Lolium perenne* y *Festuca rubra* y su idoneidad para ser implementadas en procesos de fitorremediación, para lo cual, entre otros aspectos se analizó el impacto de este metal en la producción de biomasa. En la

investigación se reportó que la especie *Lolium perenne* presentó altos niveles en biomasa para brotes y raíces, sin embargo, se registró disminución en esta variable para las 3 especies con el aumento en la concentración de Cadmio en el suelo. Asimismo, el autor destaca la afectación del Cadmio en la biomasa de los brotes, indicando que incluso la menor concentración de metal analizada, generó pérdidas en la biomasa en un 19 % para *Lolium perenne* y 40.2 % para *Poa pratensis*. Por otra parte, la mayor disminución en el promedio de biomasa radicular se reportó para *Lolium perenne* con el 53 % y la menor para *Festuca rubra* con el 42 %. En síntesis, los autores determinaron que la especie *Lolium perenne* presentó mayor potencial para ser usada en procesos de fitoestabilización de Cadmio debido a la baja disminución en la biomasa, y mayor acumulación de Cadmio en las raíces bajo el tratamiento con la menor dosis del metal.

Por otro lado, Zhong et al., (2019) se observó en su investigación que las plántulas de *Pterocypsela laciniata* analizadas bajo 6 diferentes concentraciones de Cadmio (5,10 , 25 , 50, 75 y 100 ppm) no presentaron síntomas de toxicidad . Los menores valores de biomasa se reportaron bajo las concentraciones 75 y 100 ppm y los máximos en suelos contaminados con 10 ppm, asimismo, en acción de los tratamientos 5, 10 y 25 ppm, se registraron los mayores valores de biomasa total, así como en los brotes y raíces por separado, en comparación con las plantas control. De acuerdo a estos resultados Zhong et al., (2019) señala que la especie *Pterocypsela laciniata* se clasifica en el grupo de plantas acumuladoras de Cadmio, en las cuales la biomasa aumenta hasta cierta concentración para luego disminuir, lo que se vio reflejado con el aumento del crecimiento de la planta en las concentraciones de 0 a 50 ppm y con la inhibición del crecimiento en concentraciones mayores.

La figura 11, se muestra la distribución de los datos correspondientes a la variable biomasa para los dos metales estudiados y para los casos indicados como control.

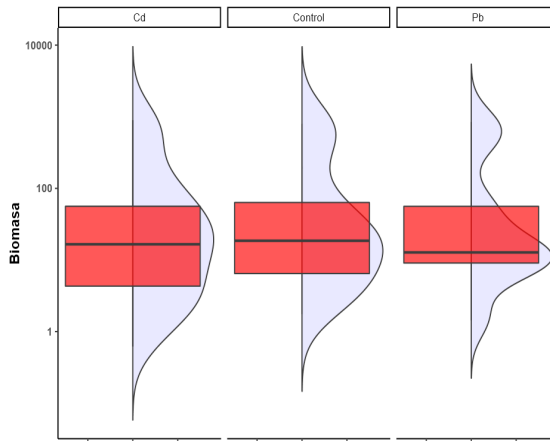


Figura 11. Box plot correspondiente a la variable “Biomasa” diferenciada para las plantas tratadas con Cadmio y Pb y para las plantas control.
Fuente: Elaboración propia

Para el caso del Cadmio la mayoría de los datos presentaron la tendencia antes mencionada, en la cual a mayor concentración de metal menor producción de biomasa. Asimismo, se evidencia una tendencia asimétrica posiblemente generada por la presencia de valores de biomasa superiores a 100 g como los reportados por Bosiacki et al., (2013) los cuales abarcan rangos de 491.4 g a 516.4 g para la especie *Amaranthus Caudatus L* y de 863.5 g a 895.5 g para la especie *Ricinus communis L* en concentraciones de Cadmio correspondientes a 1, 5 y 10 ppm. Estos valores contrastan por ejemplo con los reportados por Korzeniowska & Gołda, (2016) que oscilan entre 0.73 a 2.11g para la especie *Festuca rubra*, 0.98 g a 4.93 g para *Lolium perenne* y 0.62g a 1.93g para *Poa pratensis* en concentraciones de 30, 60 y 120 ppm. Si bien al momento de comparar estos valores se encuentran ampliamente distantes, este fenómeno puede deberse a las condiciones propias de cada experimento, en el caso del estudio desarrollado por Bosiacki et al., (2013) el experimento se realizó en un periodo de dos años, específicamente en la temporada

primavera-verano de cada año, por el contrario los registros de Korzeniowska & Gołda, (2016) corresponden a las plantas cosechadas dos meses después de su plantación. Paralelamente, la biomasa reportada por Korzeniowska & Gołda, (2016) incluyó raíces y brotes mientras que los valores indicados por Bosiacki et al., (2013) abarcan solo el peso de los brotes, asumiendo este valor como la suma del peso de tallos, hojas e inflorescencias señaladas de forma independiente por los autores.

Aunque en la mayoría de los artículos analizados se mantuvo la tendencia decreciente de la biomasa respecto al aumento de la concentración del metal, Mahdavi et al., (2014) identificaron en su investigación que bajo los tratamientos de 50, 250 y 500 (ppm) se presentó un aumento de la biomasa producida por las plántulas de la especie *Acacia victoria* en 14%, 25 % y 30% respectivamente en comparación con las plántulas control. Sin embargo, con el tratamiento de 1000 ppm se evidenció la disminución de la biomasa total en un 30% mostrando síntomas de toxicidad que incluyeron la aparición de manchas cloróticas y lesiones necróticas.

Seguidamente, como variable respuesta, se analizó el Factor de Bioconcentración (BCF) y Factor de transferencia (TF), el cual se refiere a la capacidad de la planta para captar los metales pesados del suelo y acumularlos en sus órganos (Mahdavi & Khermandar, 2018) (El-mahrouk et al., 2020).

Este factor se relaciona con la eficiencia de la planta para transferir los metales contaminantes desde las raíces hacia órganos superficiales como tallos y hojas (Mahdavi & Khermandar, 2018) y es especialmente importante en procesos de fitoextracción, de modo que en plantas hiperacumuladoras, valores de TF mayores a 1 indicarían mayor concentración de metal en las partes superficiales de la planta en comparación con las raíces mientras que las excluyentes tendrían valores de TF menores a 1 (Ahmadpour et al., 2012).

En este sentido, se ha establecido que plantas con alto BCF y bajo TF tiene potencial para ser usadas en fitoestabilización , en contraste, especies con valores de BCF y TF mayores a 1 presentan potencial para ser usadas en procesos de fitoextracción (Yoon et al. 2006 citado por Padmavathiamma & Li, 2007; H. Ali et al., 2013)

En la figura 12 se resume la distribución general del índice TF presentado por las plantas estudiadas para cada metal y para las plantas control, se observa que el valor medio presentado para las plantas control y para las plantas bajo el efecto del Plomo son similares con registros menores a 1, sin embargo, en el caso del Cadmio se observa que el índice TF tiende a ser mayor, teniendo en cuenta que el valor medio y la caja se encuentran más altas. Por otra parte, para los dos metales se observa que en el 25% de los datos se presentan valores pequeños menores a 0.10 para el Plomo estos TF son referenciados en su investigación por Zhan et al., (2018). Con referencia al Cadmio los valores más bajos corresponden a los reportados por Korzeniowska & Gołda, (2016) y por L. Sun et al., (2017) , relacionados en las dos investigaciones a la especie *Lolium perenne* lo que permite inferir que esta especie presenta una baja transferencia de Cadmio desde las raíces hasta las partes aéreas de la planta.

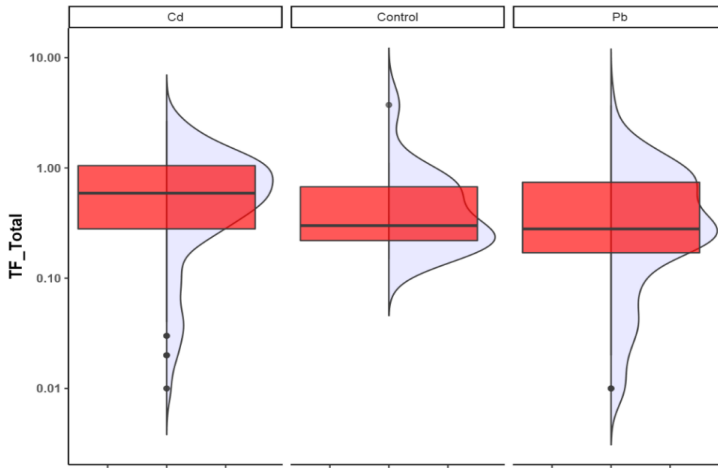


Figura 12. Box plot correspondiente a la variable “TF” diferenciada para las plantas tratadas con Cd y Pb y para las plantas control.
Fuente: Elaboración propia

En la figura 13 se muestra la distribución de la variable BCF evidencia una mayor dispersión y variabilidad de los datos correspondientes a las plantas control. Bajo la influencia de los dos metales en el suelo, se identificó que el valor central para Cadmio es mayor en comparación con el mostrado para el Plomo, de lo que se podría concluir que las plantas analizadas son más eficientes en la acumulación de Cadmio. Además es posible deducir que en los dos metales los valores de BCF superiores presentan datos similares, en este caso mayores a 1, es decir, que el 50% de los datos analizados tanto como para Cadmio y Plomo corresponden a plantas que bajo diferentes tratamientos tienen potencial para captar y acumular los metales estudiados.

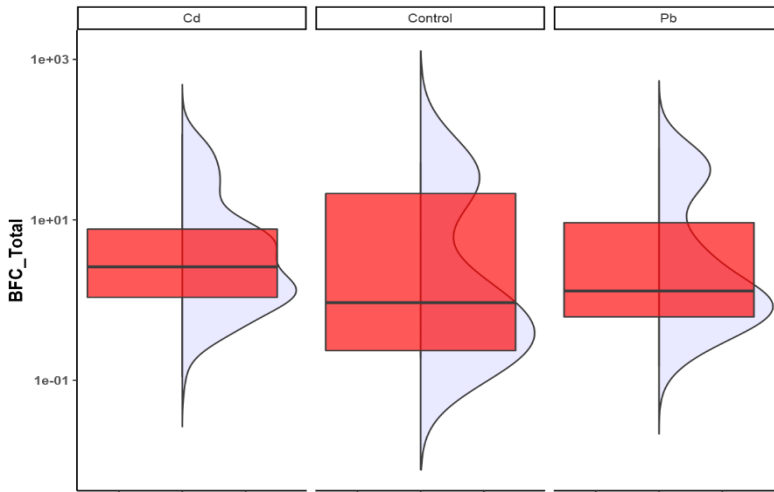


Figura 13. Box plot correspondiente a la variable “BCF” diferenciada para las plantas tratadas con Cd y Pb y para las plantas control.
Fuente: Elaboración propia

Varios estudios analizaron simultáneamente los resultados obtenidos para los dos índices con el fin de establecer el potencial remediador de determinada especie, tal es el caso de la investigación desarrollada por Abiodun et al., (2013), en la cual se evaluó la especie *Glycine max L* en suelos contaminados con Plomo, encontrando que bajo concentraciones de 10, 15 y 20 ppm los valores de BCF fueron 3.13, 1.37 y 1.38, respectivamente, con lo que se pudo inferir el potencial de esta especie como acumuladora de Plomo, igualmente, dado que en los tratamientos en los que el suelo se contaminó con 5 y 25 ppm, los valores de BCF fueron menores a 1, los individuos de *Glycine max L* también pueden actuar como excluyentes en procesos de fitorremediación. Respecto a los resultados de TF, en suelos con concentraciones de Plomo de 10, 15, 20 y 25 ppm los valores obtenidos fueron mayores a 1, de manera que esta especie es considerada de alta eficiencia para la transferencia de metales pesados desde las raíces hasta los órganos superficiales. De manera similar, S. Y. Ali et al., (2016) evaluaron el potencial de

bioacumulación de Cadmio y Plomo de las especies *Momordica charantia*, *Vigna unguiculata* y *Solanum melongena*, así como su habilidad para transferir dichos metales a brotes y hojas. En esta investigación se obtuvieron en general valores de BCF y TF menores para Plomo en comparación con los obtenidos para Cadmio. El máximo valor de BCF (1.92) fue presentado para Cadmio por la especie *Vigna unguiculata*, mientras que para Plomo, se identificó un máximo de 1.29 en las especies *Momordica charantia* y *Vigna unguiculata*. Los mayores valores de TF fueron presentados por las 3 especies para el tratamiento de Cadmio con un máximo de 2.29 en *Vigna unguiculata*, en el caso del Plomo, los valores para las 3 especies fueron inferiores a 1 con un máximo de 0.68 presentado por *Momordica charantia*. Los resultados contribuyeron a identificar a la especie *Vigna unguiculata* como la de mejor capacidad para captar mayor cantidad de Cadmio del suelo y acumularlo en los órganos superficiales. Finalmente, el cálculo de estos dos índices llevó a confirmar el potencial de las 3 especies analizadas para la fitoextracción y bioacumulación de Cadmio y Plomo.

4. Conclusiones

A partir de la revisión bibliográfica realizada, fue posible concluir que la fitorremediación es una técnica viable en la descontaminación de áreas afectadas por metales pesados como el Cd y el Pb, teniendo en cuenta que muchas de las especies analizadas mostraron potencial como plantas hiperacumuladoras aptas para procesos de fitoextracción mientras que otras evidenciaron aplicabilidad en proceso de fitoestabilización. En este sentido, considerando que las plantas son el eje principal de este tipo de técnicas, se identificó que el análisis de variables propias de la respuesta de estas a ambientes

contaminados, como lo son la producción de biomasa, el factor de bioconcentración (BCF) y el factor de transferencia (TF), entre otras, resulta fundamental para determinar la efectividad de un determinado método de fitorremediación.

En términos generales la fitorremediación ha demostrado tener un gran potencial en el tratamiento de áreas afectadas por contaminantes como los metales pesados, razón por la cual cada vez se desarrollan más estudios enfocados en determinar la eficiencia de esta técnica, utilizando diferentes especies vegetales y bajo diversas condiciones ambientales.

Desde el ejercicio realizado en esta revisión, se identificó la importancia de la fitorremediación como temática de investigación científica, lo que se vio reflejado en la gran cantidad de información alusiva al tema encontrada en las diferentes bases de datos y portales de búsqueda consultados. Metodologías asociadas a las revisiones sistemáticas constituyen una importante herramienta en el desarrollo de revisiones bibliográficas como la realizada en este caso, ya que como es conocido implica mayor rigurosidad en la selección de artículos, aspecto fundamental cuando se cuenta con tanta información disponible.

Con la ejecución del meta análisis se lograron extraer observaciones de la distribución, dispersión y comportamiento general de las variables pH, biomasa, concentración en raíces, concentración en partes aéreas de la planta, factor de bioconcentración (BCF) y factor de transferencia (TF), alrededor de los datos registrados en los 26 artículos seleccionados. Estas variables se identificaron como fundamentales al momento de entender la efectividad de un proceso o método de fitorremediación ya que permiten conocer el comportamiento de las plantas en suelos contaminados y por tanto su potencial para ser usadas para remediar áreas en diferentes escalas.

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante continuar con

el desarrollo de revisiones sistemáticas tanto cualitativas como cuantitativas, que permitan consolidar la información relacionada a esta temática. En este contexto, una propuesta interesante podría ser ceñir las revisiones a una familia botánica en particular, para de esta manera identificar características por las que una especie o género de plantas podría sobresalir sobre otras en procesos de fitorremediación para este caso de Cadmio y Plomo.

5. Bibliografía

- Abiodun, A. S., Biotechnology, N., Agency, D., & Abioye, P. O. (2019). Microbial-aided phytoremediation of heavy metals contaminated soil: a review. *European Journal of Biological Research*, 9(2), 104–125. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3244176>
- Abiodun, A. S., Josiah Ijah, U. J., & Abioye, P. O. (2013). Phytoremediation of Lead Polluted Soil by Glycine max L. *Applied and Environmental Soil Science*. <https://doi.org/10.1155/2013/631619>
- Ahmadpour, P., Ahmadpour, F., Mahmud, T. M. M., Abdu, A., Soleimani, M., & Tayefeh, F. H. (2012). *Phytoremediation of heavy metals: A green technology*. 11(76), 14036–14043. <https://doi.org/10.5897/AJB12.459>
- Ali, H., & Khan, E. (2019). Trophic transfer, bioaccumulation, and biomagnification of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in food chains/webs—Concepts and implications for wildlife and human health. *Human and Ecological Risk Assessment*, 25(6), 1353–1376. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1469398>
- Ali, H., Khan, E., & Anwar, M. (2013). Phytoremediation

- of heavy metals — Concepts and applications. *Chemosphere*, 91(7), 869–881. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.01.075>
- Ali, S. Y., Chaudhury, S., & Banerjee, S. N. (2016). Phytoextraction of cadmium and lead by three vegetable-crop plants. *Plant Science Today*. <https://doi.org/10.14719/pst.2016.3.3.247>
- Alizadeh, S. M., Etemad, V., Shirvany, A., & Shirmardi, M. (2012). Assisted phytoremediation of Cd-contaminated soil using poplar rooted cuttings. *Int. Agrophys*, 219–224. <https://doi.org/10.2478/v10247-012-0032-8>
- Bax, L., Ikeda, N., Fukui, N., Yaju, Y., Tsuruta, H., & Moons, K. G. M. (2008). More than numbers: The power of graphs in meta-analysis. *American Journal of Epidemiology*, 169(2), 249–255. <https://doi.org/10.1093/aje/kwn340>
- Beltrán, G., & Óscar, A. (2005). Revisión sistémica de la literatura. *Revista Colombiana de Gastroenterología*, 20(1), 60–69. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=337729264009>
- Bhargava, A., Carmona, F. F., Bhargava, M., & Srivastava, S. (2012). Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 105, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.002>
- Bosiacki, M., Kleiber, T., & Kaczmarek, J. (2013). Evaluation of suitability of *Amaranthus caudatus* L. and *Ricinus communis* L. in phytoextraction of cadmium and lead from contaminated substrates. *Archives of Environmental Protection*, 39(3), 47–59. <https://doi.org/10.2478/aep-2013-0022>
- Buñuel Álvarez, J., & González Rodríguez, M. (2003). Búsquedas bibliográficas a través de Internet. como encontrar la mejor evidencia disponible: Bases de datos de medicina basada en la evidencia. *Revista Pediatría de Atención Primaria*, 5(17), 109–132.
- Codina, L. (2020). Cómo hacer revisiones bibliográficas tradicionales

- o sistemáticas utilizando bases de datos académicas. *Revista ORL*, 11(2), 13p. <https://doi.org/10.14201/rev.orl.22977>
- Cristaldi, A., Oliveri, G., Hea, E., & Zuccarello, P. (2017). Environmental Technology & Innovation Phytoremediation of contaminated soils by heavy metals and PAHs . A brief review. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 309–326. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.08.002>
- Datta, S., Miltra, A., Chatterjee, S., & Vijay, V. (2013). Plant-Based Remediation Processes. *Soil Biology*, 35(May), 19–38. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35564-6>
- Eissa, M. A. (2017). Phytoextraction mechanism of Cd by *Atriplex lentiformis* using some mobilizing agents. *Ecological Engineering*, 108(January 2016), 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.025>
- El-mahrouk, E. M., Eisa, E. A. E., Ali, H. M., Hegazy, M. A. E., & Gayed, M. E. A. E.-. (2020). *Populus nigra* as a Phytoremediator for Cd, Cu, and Pb in Contaminated Soil. *BioResources*, 15(Campbell 2007), 869–893.
- El-Mahrouk, E. S. M., Eisa, E. A. H., Hegazi, M. A., Abdel-Gayed, M. E. S., Dewir, Y. H., El-Mahrouk, M. E., & Naidoo, Y. (2019). Phytoremediation of cadmium-, copper-, and lead-contaminated soil by *Salix mucronata* (Synonym *Salix safsaf*). *HortScience*, 54(7), 1249–1257. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14018-19>
- Elekes, C. C. (2014). Eco-Technological Solutions for the Remediation of Polluted Soil and Heavy Metal Recovery. In *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination. InTech*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57314>
- Elouear, Z., Bouhamed, F., Boujelben, N., & Bouzid, J. (2016). Application of sheep manure and potassium fertilizer to contaminated soil and its effect on zinc, cadmium and lead accumulation by alfalfa plants. *Sustainable Environment Research*, 26(3), 131–135. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.004>

- Evanko, C. R., & Dzombak, D. A. (1997). Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater. *Gwrtac Series, 01*(October), 1–61. <https://clu.in.org/download/toolkit/metals.pdf>
- Fattahi, B., Arzani, K., Souri, M. K., & Barzegar, M. (2019). Effects of cadmium and lead on seed germination, morphological traits, and essential oil composition of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.). *Industrial Crops and Products, 138*(June), 111584. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111584>
- Fernández-Altuna, M. de los Á., Martínez del Prado, A., Gutiérrez Rayón, D., Arriarán Rodríguez, E., Toriz Castillo, H. A., Betancourt Cravioto, M., & Lifshitz Guinzberg, A. (2016). Encontrar sin perderse: ¿se ha frustrado al buscar la información médica que necesita? *Investigación En Educación Médica, 5*(18), 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.riem.2015.10.001>
- Garrido Mora, A. (2005). Estrategia General de Búsqueda. *Enfuro, 24*(93), 30–32.
- Gasparyan, A. Y., Ayyazyan, L., & Kitas, G. D. (2013). Multidisciplinary bibliographic databases. *Journal of Korean Medical Science, 28*(9), 1270–1275. <https://doi.org/10.3346/jkms.2013.28.9.1270>
- Ghori, Z., Iftikhar, H., Bhatti, M. F., Sharma, I., & Kazi, A. G. (2016). Chapter 15 – Phytoextraction: The Use of Plants to Remove Heavy Metals from Soil. In *Plant Metal Interaction* (pp. 385–409). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803158-2.00015-1>
- Ghosh, M, Singh, S. (2005). A Review on Phytoremediation of Heavy Metals and Utilization of It ' s by Products. *Asian Journal on Energy and Environment, 6*(04), 214–231. https://doi.org/10.15666/aeer/0301_001018
- Gómez-Luna, E., Navas, D. F., Aponte-Mayor, G., & Betancourt-Buitrago, L. A. (2014). Literature review methodology

- for scientific and information management, through its structuring and systematization. *Dyna*, 81(184), 158. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>
- Gong, Y., Zhao, D., & Wang, Q. (2018). An overview of field-scale studies on remediation of soil contaminated with heavy metals and metalloids: Technical progress over the last decade. *Water Research*, 147, 440–460. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.10.024>
- González, J. A., & Cobo, E. (2014). Revisión sistemática y meta-análisis. In *Bioestadística para no estadísticos*. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/183176/t15_metanalisis-5228.pdf
- Hammami, H., Parsa, M., Hassan, M., Mohassel, R., Rahimi, S., & Mijani, S. (2016). Weeds ability to phytoremediate cadmium-contaminated soil. *International Journal Of Phytoremediation*, 18(1), 48–54. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/15226514.2015.1058336>
- Hassan, M., Mohassel, R., & Hammami, H. (2015). *Phytoremediation of Lead-Contaminated Soil by Sinapis arvensis and Phytoremediation of lead-contaminated soil by Sinapis arvensis and Rapistrum rugosum*. November. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109607>
- Isaura, J.-A. (2010). *Capacidad de amortiguación de la contaminación por plomo y por cadmio en suelos de la comunidad de Madrid* [Universidad Complutense de Madrid]. <https://eprints.ucm.es/12511/>
- Kathal, R., Malhotra, P., & Chaudhary, V. (2016). Phytoremediation of Cadmium from Polluted Soil. *Journal of Bioremediation & Biodegradation*, 7(6), 6–8. <https://doi.org/10.4172/2155-6199.1000376>
- Khonsue, B. P. N. (2015). Bacterial-assisted cadmium phytoremediation by *Ocimum gratissimum* L. in polluted agricultural soil: a field trial experiment. *International*

- Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0816-z>
- Korzeniowska, J., & Gołda, S. (2016). Comparison of phytoremediation potential of three grass species in soil contaminated with cadmium. *Chrona Srodowiska i Zasobów Naturalnych*, 27(1(67)), 8–14. <https://doi.org/10.1515/oszn-2016-0003>
- Laghlimi, M., Baghdad, B., Hadi, H. El, & Bouabdli, A. (2015). Phytoremediation Mechanisms of Heavy Metal Contaminated Soils : A Review. *Open Journal of Ecology*, 5, 375–388. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/oje.2015.58031>
- Lasat, M. M. (1999). Phytoextraction of Metals from Contaminated Soil: A Review of Plant/Soil/Metal Interaction and Assessment of Pertinent Agronomic Issues. *Journal of Hazardous Substance Research Volume*, 2. <https://doi.org/https://doi.org/10.4148/1090-7025.1015>
- Letelier, L. M., Manríquez, J., & Rada, G. (2005). Revisiónes sistemáticas y metaanálisis: ¿son la mejor evidencia? *Rev Méd Chile*, 133, 246–249. <http://www.scielo.cl/pdf/rmc/v133n2/art15.pdf>
- Li, J., Baker, A. J. M., Ye, Z., Wang, H., & Shu, W. (2012). Phytoextraction of Cd-Contaminated Soils : Current Status and Future Challenges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42, 2113–2152. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574105>
- Londoño-franco, L. F., Londoño-muñoz, P. T., & Muñoz-garcía, F. G. (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustria*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)
- Long, X., Ni, N., Wang, L., Wang, X., Wang, J., Zhang, Z., Zed, R., Liu, Z., & Shao, H. (2013). Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Soil by Two Jerusalem Artichoke (*Helianthus*

- tuberosus L.) Genotypes. *CLEAN Soil Air Water*, 41(2), 202–209. <https://doi.org/10.1002/clen.201100668>
- Longley, K., & Consulting, A. (2007). *The feasibility of poplars for phytoremediation of TCE contaminated groundwater: a cost-effective and natural alternative means of groundwater treatment* [The Evergreen State College]. https://www.researchgate.net/publication/265191596_The_Feasibility_Of_Poplars_For_Phytoremediation_Of_Tce_Contaminated_Groundwater_A_Cost-Effective_And_Natural_Alternative_Means_Of_Groundwater_Treatment
- Lu, H., Fu, S., Méndez, A., & Gascó, G. (2014). Use of phytoremediation and biochar to remediate heavy metal polluted soils : a review. *Solid Earth*, 5, 65–75. <https://doi.org/10.5194/se-5-65-2014>
- Mahdavi, A., & Khermandar, K. (2018). Potential of Lead and Cadmium Accumulation In Washingtonia filifera Potential of Lead and Cadmium Accumulation In Washingtonia filifera. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions A: Science, January*. <https://doi.org/10.1007/s40995-018-0508-x>
- Mahdavi, A., Khermandar, K., Ahmady, S., & Tabaraki, R. (2014). Lead Accumulation Potential In Acacia Victoria. *International Journal Of Phytoremediation*, 582–592. <https://doi.org/10.1080/15226514.2013.798624>
- Majid, N. M., Islam, M. M., Rauf, R. A., Ahmadpour, P., & Abdu, A. (2012). Assessment of heavy metal uptake and translocation in *Dyera costulata* for phytoremediation of cadmium contaminated soil. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science*, 62:3, 245–250. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/09064710.2011.603740>
- Martínez Sepúlveda, J. A., & Casallas, M. R. (2018). *Contaminación y remediación de suelos en Colombia: aplicación a la minería de oro* (U. EAN (ed.); 1a edición). <https://doi.org/10.21158/9789587565836>
- McIntyre, T. (2003). Phytoremediation of heavy metals from

- soils. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 78, 97–123. https://doi.org/10.1007/3-540-45991-x_4
- Merino-trujillo, A. (2013). Como escribir documentos científicos. Artículo de revisión. *Salud En Tabasco*, 19(3), 90–94. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48721182006>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., & Altman, D. G. (2014). Items de referencia para publicar Revisiones Sistemáticas y Metaanálisis: *Rev Esp Nutr Hum Diet*, 18(3), 172–181. http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/deed.es_CO%5Cnwww.renhyd.org
- Moosavi, S. G., & Seghatoleslami, M. J. (2013). Phytoremediation : A review. *Advance in Agriculture and Biology*, 1(1), 5–11. https://www.researchgate.net/publication/283746120_Phytoremediation_a_review
- Nascimento, S. M. de S. G., Souza, A. P. de, Lima, V. L. A. de, do Nascimento, C. W. A., & do Nascimento, J. J. V. R. (2016). Phytoextractor potential of cultivated species in industrial area contaminated by lead. *Revista Brasileira de Ciencia Do Solo*, 40, 1–14. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20140805>
- Ortiz, I., Sanz, J., Dorado, M., & Villar, S. (n.d.). *Técnicas de recuperación de suelos contaminados* (U. de Alcalá (ed.)). <http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM001700.pdf>
- Padmavathiamma, P. K., & Li, L. Y. (2007). Phytoremediation Technology : Hyper-Accumulation Metals in Plants Phytoremediation Technology : Hyper-accumulation Metals in Plants. *Water Air Soil Pollut*, 184(2007), 105–126. <https://doi.org/10.1007/s11270-007-9401-5>
- Preet, G., Sidhu, S., Shreeya, A., Pal, H., Batish, D. R., & Kumar, R. (2018). Phytoremediation of lead by a wild , non-edible Pb accumulator *Coronopus didymus* (L .) Brassicaceae. *International Journal Of Phytoremediation*, 20(5), 483–489. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1374331>

- Radojčić Redovniković, I., De Marco, A., Proietti, C., Hanousek, K., Sedak, M., Bilandžić, N., & Jakovljević, T. (2017). Poplar response to cadmium and lead soil contamination. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 144(February), 482–489. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.06.011>
- Rizwan, M., Ali, S., Zia ur Rehman, M., Rinklebe, J., Tsang, D. C. W., Bashir, A., Maqbool, A., Tack, F. M. G., & Ok, Y. S. (2018). Cadmium phytoremediation potential of Brassica crop species: A review. *Science of the Total Environment*, 631–632, 1175–1191. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.104>
- Rock, S., Pivetz, B., Madalinski, K., Adams, N., & Wilson, T. (2000). Introduction to Phytoremediation. In *U.S. Environmental Protection Agency*. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NRMRL&dirEntryId=63433
- Sabeen, M., Mahmood, Q., Irshad, M., Fareed, I., Khan, A., Ullah, F., Hussain, J., Hayat, Y., & Tabassum, S. (2013). Cadmium Phytoremediation by *Arundo donax* L. from Contaminated Soil and Water. *BioMed Research International*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1155/2013/324830>
- Salama, A. K., Osman, K. A., & Gouda, N. A. R. (2016). Remediation of lead and cadmium-contaminated soils. *International Journal of Phytoremediation*, 18(4), 364–367. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109597>
- Sarma, H. (2011). Metal Hyperaccumulation in Plants: A Review Focusing on Phytoremediation Technology. *Journal of Environmental Science and Technology*, 4(2), 118–138. <https://doi.org/10.3923/jest.2011.118.138>
- Sarwar, N., Imran, M., Rashid, M., Ishaque, W., Asif, M., Matloob, A., Rehim, A., & Hussain, S. (2017). Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals : Modifications and future perspectives. *Chemosphere*, 171, 710–721. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.12.116>

- Sauvé, S., McBride, M. B., & Hendershot, W. H. (1997). Speciation of lead in contaminated soils. *Environmental Pollution*, *98*(2), 149–155. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00139-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00139-5)
- Saxena, P. K., KrishnaRaj, S., Dan, T., Perras, M. R., & Vettakkorumakankav, N. N. (1999). Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated and Polluted Soils. *Heavy Metal Stress in Plants*, *8*, 305–329. https://doi.org/10.1007/978-3-662-07745-0_14
- Semple, K. T., Morriss, A. W. J., & Paton, G. I. (2003). Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: Fundamental concepts and techniques for analysis. *European Journal of Soil Science*, *54*(4), 809–818. <https://doi.org/10.1046/j.1351-0754.2003.0564.x>
- Sewalem, N., Elfeky, S., Shintinawy, F. E.-, Sewalem, N., Elfeky, S., & Shintinawy, F. E.-. (2014). Phytoremediation of Lead and Cadmium Contaminated Soils using Sunflower Plant. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, *10*(1), 122–134.
- Sheoran, V., Sheoran, A. S., & Poonia, P. (2011). Role of hyperaccumulators in phytoextraction of metals from contaminated mining sites: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *41*(2), 168–214. <https://doi.org/10.1080/10643380902718418>
- Shirkhani, Z., Chehregani Rad, A., Gholami, M., & Mohsenzadeh, F. (2018). Phytoremediation of Cd-contaminated Soils by *Datura stramonium* L. *Toxicology and Environmental Health Sciences*, *10*(3), 168–178. <https://doi.org/10.1007/s13530-018-0361-5>
- Silva, J. R. R., Fernandes, A. R., Junior, M. L. S., Santos, C. R. C., & Lobato, A. K. S. (2018). Tolerance mechanisms in *Cassia alata* exposed to cadmium toxicity – potential use for phytoremediation. *Photosynthetica*, *56*, 495–504. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11099-017-0698-z>
- Singh, J., & Kalamdhad, A. S. (2011). Effects of Heavy Metals on Soil, Plants, Human Health and Aquatic Life. *International*

- Journal of Research in Chemistry and Environment*, 1(2), 15–21. www.ijrce.org
- Somasundaram, J., Krishnasamy, R., Mahimairaja, S., & Savithri, P. (2006). Dynamics of lead (Pb) in different soil conditions. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 48(2), 123–128.
- Song, X., Hu, X., & Ji, P. (2012). Phytoremediation of Cadmium-Contaminated Farmland Soil by the Hyperaccumulator *Beta vulgaris* L . var . cicla. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 88, 623–626. <https://doi.org/10.1007/s00128-012-0524-z>
- Sun, L., Cao, X., Li, M., Zhang, X., Li, X., & Cui, Z. (2017). *Enhanced bioremediation of lead-contaminated soil by Solanum nigrum* L . with *Mucor circinelloides*. February 2020. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8637-x>
- Sun, R., Jin, C., & Zhou, Q. (2010). Characteristics of cadmium accumulation and tolerance in *Rorippa globosa* (Turcz .) Thell ., a species with some characteristics of cadmium hyperaccumulation. *Plant Growth Regu*, 61, 67–74. <https://doi.org/10.1007/s10725-010-9451-3>
- Tangahu, B. V., Sheikh Abdullah, S. R., Basri, H., Idris, M., Anuar, N., & Mukhlisin, M. (2011). A review on heavy metals (As, Pb, and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011. <https://doi.org/10.1155/2011/939161>
- Tauqeer, H. M. (2013). Heavy Metals Contamination and what are the Impacts on Living Organisms. *Greener Journal of Environmental Management and Public Safety*, 2(4), 172–179. <https://doi.org/10.15580/GJEMPS.2013.4.060413652>
- Thangavel P, S. C. (2004). Phytoextraction Role of Hyperaccumulators in Metal Contaminated Soils. In *Proceedings of the Indian National Science Academy* (Vol. B70, Issue 1, pp. 109–130).

- Universidad de la Rioja. (s.f.). *Dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/info/ayuda/qe>
- Varun, M., Souza, R. D., & Paul, M. S. (2011). *Phytoextraction Potential of Prosopis juliflora (Sw .) DC . with Specific Reference*. July. <https://doi.org/10.1007/s00128-011-0305-0>
- Vidali, M. (2011). Bioremediation - An overview. *Journal of Industrial Pollution Control*, 27(2), 161–168. <https://doi.org/https://doi.org/10.1351/pac200173071163>
- Volke, T., Velasco, J., & Perez, D. la R. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides* (Issue September 2016). <https://books.google.com.ec/books?isbn=9688174920>
- Wanden-Berghe, C., Veiga de Cabo, J., Sanz-Valero, J., Pérez de la Cruz, A., Culebras Fernández, J., García de Lorenzo, A., Gil Hernández, Á., Laborda González, L., & Sánchez-Álvarez, C. (2009). *De la pregunta de investigación a la ecuación de búsqueda biblioFigura: los Descriptores en las Ciencias de la Nutrición* (Issue January). <https://doi.org/10.13140/2.1.4345.1686>
- Wang, X., Chen, C., & Wang, J. (2017). Cadmium phytoextraction from loam soil in tropical southern China by *Sorghum bicolor*. *International Journal of Phytoremediation*, 19(6), 572–578. <https://doi.org/10.1080/15226514.2016.1267704>
- World Health Organization. (2019). Exposure to cadmium: a major public health concern. *Preventing Disease Through Healthy Environments*, 3–6. <http://www.who.int/ipcs/features/cadmium.pdf>
- World Health Organization. (2019). Exposure to Lead: A major public health concern (2019 revision). *World Health Organization*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.12.007>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils : A Review of Sources , Chemistry

- , Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Network*. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>
- Zaurov, D.E., Perdomo, P., & Raskin, I. (1999). Optimizing soil fertility and pH to maximize cadmium removed by indian mustard from contaminated soils. *Journal of Plant Nutrition*, 22(6), 977–986. <https://doi.org/10.1080/01904169909365687>
- Zhan, J., Li, T., Yu, H., & Zhang, X. (2018). Cd and Pb accumulation characteristics of phytostabilizer *Athyrium wardii* (Hook.) grown in soils contaminated with Cd and Pb. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-018-2916-z>
- Zhang, H., Guo, Q., Yang, J., Ma, J., Chen, G., Chen, T., Zhu, G., Wang, J., Zhang, G., Wang, X., & Shao, C. (2016). Comparison of chelates for enhancing *Ricinus communis* L. phytoremediation of Cd and Pb contaminated soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 133, 57–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.05.036>
- Zhang, Y., Li, F., Xu, W., Ren, J., Chen, S., Shen, K., & Long, Z. (2019). Enhanced Phytoextraction for Co-contaminated Soil with Cd and Pb by Ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 103(1), 147–154. <https://doi.org/10.1007/s00128-019-02661-7>
- Zhong, L., Lin, L., Liao, M., Wang, J., Tang, Y., Sun, G., Liang, D., & Xia, H. (2019). Phytoremediation potential of *Pterocypsela laciniata* as a cadmium hyperaccumulator. *Environmental Science and Pollution Research*, 26, 13311–13319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11356-019-04702-4>

Capítulo 8

El patrimonio social y ambiental
como herramienta para la
planificación territorial de áreas
protegidas. Caso de estudio:
Parque Natural Regional Serranía
de las Quinchas. Boyacá,
Colombia⁸

*Social and environmental
heritage as a tool for territorial
planning of protected areas. Case
study: Serranía de las Quinchas
Regional Natural Park. Boyacá,
Colombia*

⁸ Autores: Castro Ortegón, Yuddy Alejandra, Franco Soto, Angie Daniela, Acosta Castellanos, Pedro Mauricio, Lina Patricia Vega. Universidad Santo Tomás, Seccional Tunja. Colombia

RESUMEN

El parque Natural Regional Serranía las Quinchas (PNRSQ), es un relictos ambiental que fue declarado área protegida mediante acuerdo No 0028 en el 2008 por la corporación autónoma de Boyacá, esta acción permitió generar afectaciones tanto a nivel social como a nivel económico en la comunidad, ya que las prácticas económicas convencionales se tuvieron que dejar a un lado para asegurar la conservación del área protegida. La investigación, tuvo como objetivo establecer el patrimonio socio ambiental de la Vereda Las Quinchas, en la zona de amortiguación y dentro de la zona de reserva a partir de un análisis de coberturas vegetales entre los años 2000 a 2018, determinando las variaciones en cuanto a biodiversidad desde la declaratoria con el fin de incentivar la planificación de un territorio que requiere de la generación de estrategias económicas bajo los lineamientos de sostenibilidad, a partir de la utilización de la metodología Corine Land Cover y Diagnostico Rural Participativo se realizó un análisis de los cambios de coberturas vegetales en la zona de amortiguación antes y después de la declaratoria para finalmente generar la construcción del patrimonio socio ambiental mediante la identificación y estudio de valores compartidos del área de estudio.

Palabras Clave: Sostenibilidad; Áreas Protegidas; Patrimonio Ambiental; Patrimonio Cultural; Planificación Territorial.

ABSTRACT

The Serranía las Quinchas Regional Natural Park (PNRSQ) is an environmental relict that was declared a protected area by agreement No. 0028 in 2008 by the Boyacá Autonomous Corporation. This action generated social and economic impacts on the community, since conventional economic practices had to be set aside to ensure the conservation of the protected area. The objective of the research was to establish the socio-environmental heritage of Vereda Las Quinchas, in the buffer zone and within

the reserve zone based on an analysis of vegetation cover between 2000 and 2018, determining the variations in terms of biodiversity since the declaration in order to encourage the planning of a territory that requires the generation of economic strategies under the guidelines of sustainability, based on the use of the Corine Land Cover methodology and Participatory Rural Appraisal, an analysis was made of the changes in vegetation cover in the buffer zone before and after the declaration in order to finally generate the construction of the socio-environmental heritage through the identification and study of shared values of the study area.

Keywords: Sustainability; Protected Areas; Environmental Heritage; Cultural Heritage; Territorial Planning.

1. Introducción

El patrimonio cultural y ambiental está expuesto a desafíos como el cambio climático y la explotación de los recursos naturales producto de las actividades antrópicas; lo cual afecta de forma directa y en mayor porcentaje a las poblaciones rurales dada la disminución de la oferta de bienes y servicios ecosistémicos; poniendo en riesgo el aseguramiento de la seguridad alimentaria, la soberanía alimentaria y el disfrute de un ambiente sano (Kobal, 2002). A partir de lo anterior, se genera la necesidad de proteger y conservar el patrimonio socio ambiental, con el fin de garantizar el acceso a la diversidad biológica y cultural, su disfrute dentro de las comunidades y la generación de estrategias que permitan hacer uso del mismo tanto de las generaciones presentes y futuras (Fernando et al., 2018).

Debido al proceso de reestructuración del Estado Colombiano que se realizó en 2011, mediante Decreto No. 3572 de 2011 se crea los Parques Nacionales Naturales de Colombia como una Unidad Administrativa Especial (Corpoboyacá, 2019), esto con el fin de administrar y manejar tanto las áreas protegidas como los parques naturales de acuerdo a la normatividad vigente y el manejo sostenible de los recursos. De acuerdo a lo anterior se evidencia como las **áreas naturales más importantes gozan de reconocimiento a nivel internacional y nacional, lo que ha llevado a la generación de planes para su adecuado control y**

vigilancia de manera que se establezcan medidas para combatir amenazas como: deforestación, agricultura y ganadería extensiva y prácticas como la introducción de especies exóticas y la caza furtiva (Acosta et al., 2020).

El desarrollo territorial en áreas rurales, está determinado como un proceso que procura la transformación productiva e institucional de los espacios de la periferia, cuyo fin es reducir la pobreza rural e incrementar la riqueza territorial sin afectar negativamente el ambiente (Schejtman & Berdegué, 2004). Actualmente, en Colombia la pobreza monetaria ha disminuido de un 28,0 % para el 2016 al 26,9 % para el año 2019, esto relacionado de forma directa con las estrategias que se han implementado para alcanzar uno de los objetivos del desarrollo sostenible “Disminución de la pobreza”. Si bien es cierto, los índices demuestran la disminución de la pobreza en Colombia, son muchos los sectores rurales que presentan limitaciones en el desarrollo de sus actividades económicas convencionales a causa de la falta de generación de estrategias y planeación territorial, tal es el caso de las zonas ubicadas en torno a zonas protegidas, en las que se evidencia una marcada limitación en la ejecución de actividades económicas tradicionales.

El presente estudio pretende establecer el patrimonio socio ambiental de la vereda las quinchas del municipio de Otanche, Boyacá a partir de la implementación de sistemas de información geográfico como la metodología Corín Land Cover y metodologías de trabajo comunitario como el diagnostico rural participativo, con el fin de contribuir a la planificación rural de la región desde la generación de estrategias económicas sostenibles.

2. Antecedentes

El municipio de Otanche presenta una posición estratégica ambiental, en él se encuentra el cinturón esmeraldífero occidental, el cual posee un gran legado natural representado en la riqueza arqueológica e histórica. Cuenta con recursos naturales como el río Minero, la Laguna de Fuquene y La Serranía de Las Quinchas (Corpoboyacá, 2019), la cual fue declarada como área de reserva mediante el acuerdo Número 028 del 2008 por la corporación autónoma de Boyacá, esto con el fin de proteger a perpetuidad los ecosistemas, la biodiversidad, Comunidades bióticas, recursos genéticos y especies silvestres, y asegura la permanencia en la prestación de bienes y servicios ambientales (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2008) De acuerdo a lo anterior, los residentes de la zona presentan afectaciones en sus estructuras sociales y culturales, lo que impide la realización de prácticas económicas convencionales, ya que la mayoría se basan en el uso del suelo por aptitud agrícola, limitando a la población a tener su desarrollo económico de acuerdo a sus costumbres, por lo anterior diferentes instituciones académicas y entes gubernamentales han generado propuestas para esta comunidad.

Según el diagnóstico, presentado en el documento técnico de soporte del Plan de manejo, el municipio cuenta sólo con dos corregimientos, 11 veredas y 10 centros poblados. El Parque Natural Regional Serranía de Las Quinchas hace parte de lo que es nombrado como “vereda Las Quinchas” (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2016) actualmente esta vereda está catalogada como una de las que presenta la mayor densidad de población, tiene casi la totalidad de su territorio en la zona de Parque con un (83%) y 17% en su área de función amortiguadora (Jose , 2017). El municipio de Otanche cuenta con un valor del 41,25 unidades de índice de condiciones de vida para el 2005 (Alcaldía de Otanche, 2003), esto indica que el municipio presenta una concentración de pobreza en las familias que habitan la zona

rural para ese periodo. Por anterior se plantea como principal problemática el desconocimiento de los residentes de la zona, sobre los bienes y servicios ecosistémicos con los que cuentan y las posibles actividades económicas sostenibles que se pueden desarrollar en la región. Diferentes estudios han permitido la construcción de algunos términos descritos a continuación:

3. Desarrollo sostenible y conocimiento del territorio

(Brundtland, 1987), establece el desarrollo sostenible como aquel que: “busca satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para alcanzar sus propias necesidades” (Brundtland, 1987); otras definiciones como la de la (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2021), define el desarrollo sostenible como: “satisfacer nuestras necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas”. En este sentido el desarrollo sostenible se alcanza en la combinación entre bienestar social y conservación del medio ambiente (Castellanos et al., 2020).

sumado a un crecimiento económico, es decir, se debe lograr satisfacer las necesidades de índole económico, social, de diversidad cultural y de un medio ambiente sano de las generaciones actuales disminuyendo el riesgo de la satisfacción de las necesidades de las próximas generaciones, logrando de esta manera contribuir tanto en las condiciones de vida de la población presente sin comprometer de manera significativa el entorno natural (Castro et al., 2020). Con el fin de proponer espacios y proyectos de desarrollo que sean sostenibles, es necesario ordenar el territorio; entendiendo que el territorio no

solo se concibe como un espacio geográfico, además disposición de recursos naturales disponibles para ser potencialmente utilizados (CZERNY et al., 2018).

4. Metodología de diagnóstico rural participativo

Para el diagnóstico y conocimiento territorial existen diferentes tipologías para la exploración, análisis y explotación de una zona o región o comunidad; una de las metodologías que se destacan para conocimiento y el diagnóstico de territorios es el diagnóstico rural participativo DRP el cual permite implementar una serie de herramientas y de esta manera aplicarlas para obtener datos de conocimiento, diagnóstico y funcionalidad de una comunidad, con el fin de abstraer la información necesaria para el análisis y evaluación de un territorio (Nariño, 2017). En referencia a las dinámicas territoriales, es preciso anotar que es necesario realizar un método de análisis de los cambios en las dimensiones productivas, ambientales y sociales como una manera de determinar los patrones asociados a los cambios, adaptabilidades y resiliencias de una comunidad a una, transiciones económicas, políticas y temporales en un determinado territorio.

Serranía Las Quinchas

El Parque Natural Serranía Las Quinchas se encuentra ubicado dentro de jurisdicción de los municipios de Puerto Boyacá y Otanche en el Departamento de Boyacá, cuenta con un total de 21.159 hectáreas (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2016). Su declaración fue realizada mediante acuerdo No. 0028

de 2008 por la Corporación Autónoma Regional de Boyacá CORPOBOYACÁ, con el fin de “Proteger a perpetuidad sus ecosistemas, la biodiversidad, comunidades bióticas, recursos genéticos y especies silvestres, y asegurar permanencia en prestación de bienes y servicios ambientales” (Corpoboyacá, 2019)

5. Marco legal

Para este estudio se tuvieron en cuenta diferente normatividad, la cual fue fundamental para el desarrollo del Proyecto, a continuación se presenta el marco legal construido para la investigación Tabla 1.

Tabla 1. Marco legal Parque natural regional Serranía Las Quinchas.

Marco Normativo	
El Código de Recursos Naturales – Decreto 2811 de 1974.	El Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente aborda toda la reglamentación en el manejo y la defensa de los recursos naturales renovables, así como la defensa del ambiente contra la acción nociva de fenómenos naturales y demás elementos y factores que conforman el ambiente e influyen en él. Entre otros aspectos, reconoció al ambiente como patrimonio común y estableció responsabilidades para su preservación y manejo Artículo 1 ; denomina al Sistema de Parques Nacionales como el conjunto de áreas con valores excepcionales para el patrimonio nacional que, en beneficio de los habitantes de la nación y debido a sus características naturales, culturales o históricas, se reserva y declara comprendida en cualquiera de las categorías que adelante se enumeran. Se establecen sus finalidades, los tipos de áreas que lo conforman, necesidad de determinar las zonas amortiguadoras y las orientaciones para su administración y uso Artículo 327 (Presidencia de la República, 1974)

<p>La Ley 99 de 1993.</p>	<p>Creó el Ministerio del Medio Ambiente (hoy Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible), reordenó el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, organizó el Sistema Nacional Ambiental, SINA y dictó otras disposiciones en asuntos ambientales. Entre otros aspectos, estableció que la biodiversidad del país, por ser patrimonio nacional y de interés de la humanidad debe ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible Artículo 1 Y Artículo 2 (Congreso de la República de Colombia, 1993).</p>
<p>Ley 165 de 1994.</p>	<p>El estado colombiano mediante esta Ley aprueba el “Convenio de las Naciones Unidas sobre Diversidad Biológica”, en cumplimiento de los compromisos adquiridos en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo celebrada en Río de Janeiro el 5 de junio de 1992. Este convenio tiene como objetivos: i) “la conservación de la diversidad biológica, ii) la utilización sostenible de sus componentes y iii) la participación justa y equitativa en los beneficios que se deriven de la utilización de los recursos genéticos”.</p> <p>Por otro lado, solicita a la partes, la adopción de diversos compromisos, entre otros: elaborar estrategias, planes o programas nacionales para la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica; establecer un sistema de áreas protegidas o áreas donde haya que tomar medidas especiales para conservar la diversidad biológica; elaborar directrices para la selección, establecimiento y ordenación de áreas protegidas o áreas donde haya que tomar medidas especiales para la conservación in situ de la biodiversidad (Congreso de la República de Colombia, 1994)</p>

<p>Decreto Único 1076 del 2015, que compiló el Decreto 2372 del 2010.</p>	<p>La expedición del Decreto 2372 del 1 de julio de 2010 el cual fue compilado por el Decreto Único Reglamentario de Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible No. 1076 del 2015, en el que se establece la reglamentación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas, las categorías de manejo que lo conforman y los procedimientos generales relacionados con el Sistema. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010)</p>
<p>Documento CON-PES 3680/10</p>	<p>El documento de política CONPES 3680 oficializado el 21 de julio de 2010 por el Consejo Nacional de Política para el Sistema Nacional de Áreas Protegidas el cual establece los “lineamientos para la consolidación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas”, tiene como objetivo central:</p> <p>Establecer las pautas y orientaciones para avanzar en la consolidación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas de Colombia como un sistema completo, ecológicamente representativo y eficazmente gestionado, de forma que contribuya al ordenamiento territorial, al cumplimiento de los objetivos nacionales de conservación y al desarrollo sostenible en el que está comprometido el país (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2010).</p> <p>Sus tres objetivos específicos, están orientados a fortalecer cada uno de los atributos del Sistema así: Definir los mecanismos necesarios para avanzar hacia un Sistema Nacional de Áreas Protegidas completo que incorpore todos sus componentes de manera consistente, complementaria y sinérgica. Aumentar la representatividad ecológica del sistema, a partir de la declaratoria o ampliación de áreas protegidas que estén localizadas en sitios altamente prioritarios, que consideren así mismo elementos para mejorar la conectividad e integridad ecológica y que asegure la generación de servicios ambientales, tales como el agua. Contar con una estrategia financiera y de manejo de recursos de información que permita orientar y evaluar el manejo efectivo del SINAP.</p>

<p>Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE).</p>	<p>El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible estableció la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos (PNGIBSE), al cual plantea un cambio significativo en la forma de gestión de la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos “de manera que permita conservarla, haciendo frente al cambio ambiental de origen humano y manteniendo la resiliencia en los sistemas socio-ecológicos, para contribuir al mejoramiento del bienestar y la calidad de vida de los colombianos”. Adicionalmente, el documento establece la relación entre el marco estratégico de la Política y el cumplimiento de las Metas Aichi para el 2020 del Convenio de Diversidad Biológica (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021)</p>
<p>Constitución política colombiana en el inciso segundo del artículo 80</p>	<p>Establece que “El estado planificará el manejo y el aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación o restauración o sustitución” (Biblioteca Enrique Low Murtra, 2005)</p>
<p>Decreto 615 de 1957</p>	<p>Determina los límites entre Otanche y Puerto Boyacá. Artículo 3. “segréguese del territorio Vásquez la comarca que formará el municipio de puerto Vásquez con los siguientes linderos: desde la desembocadura de la quebrada torturó en el río guaguaquí sigue éste abajo hasta la confluencia del río negro, está abajo hasta la desembocadura en el río magdalena, que limita con Cundinamarca; sigue el río magdalena abajo, limita con Antioquia, hasta donde recibe las aguas del río ermitaño, esto arriba a dar a la serranía de las quinchas, limita con Santander; de este punto por la misma serranía a buscar el origen de la quebrada torturó y ésta abajo hasta su confluencia con el río guaguaquí, que limita con el territorio Vásquez (zona Otanche), primer lindero y encierra” (Presidencia de la República de Colombia, 1957)</p>

<p>Artículo 1 de la Ley del 99 del 1993</p>	<p>De acuerdo a este artículo la formulación de políticas ambientales tendrá en cuenta el resultado del progreso de investigación científica y que en este sentido los estudios realizados por COROBOYACA en la serranía las Quinchas aportan argumentos científicos y técnicos que obligan la formulación de acciones y políticas conducentes a la consolidación de una área protegida conformada por los ecosistemas estratégicos de la región que actualmente se encuentra sin protección (<i>Ley 99 de 1993, 1993</i>)</p>
<p>Acuerdo 027 del 19 de noviembre de 2001</p>	<p>Por el cual se adopta el plan de ordenamiento territorial municipal, se definen los usos del suelo para las diferentes zonas de los sectores rural y urbano, se establecen las reglamentaciones urbanísticas correspondientes y se plantean los planes complementarios para el futuro desarrollo territorial del municipio de Otanche, Boyacá. Que hace su descripción del territorio municipal desde la quebrada de la pisca con el río Chirche (Guaguaquí) (Alcaldía de Otanche, 2003)</p>

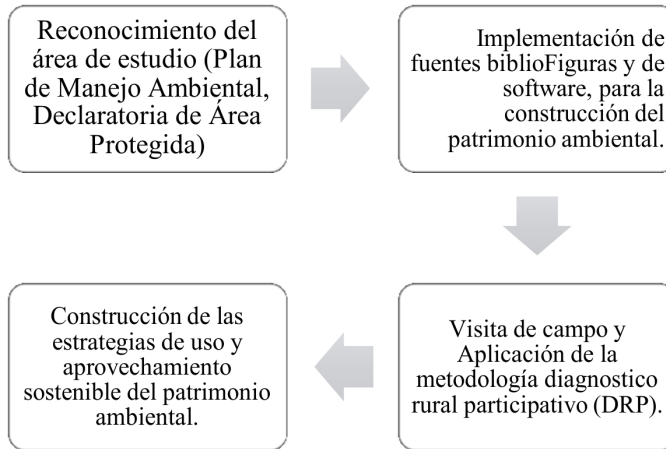
Fuente: Autores.

6. Metodología.

Para el desarrollo metodológico, se da inicio con la selección del área de estudio identificando la problemática de la zona, desde la identificación de elementos claves como el plan de manejo ambiental y la declaratoria 0028 del 2008, se determinan los factores positivos y negativos de la zona de reserva. Desde una revisión bibliográfica se establecen las herramientas para el análisis de coberturas vegetales (Melo & Camacho, 2005) y la consolidación de los elementos de orden social (Verdejo, 2003). A nivel de coberturas, se seleccionaron las imágenes satelitales Landsat 4-5 y Landsat 8 con el fin de determinar los cambios de cobertura antes y después de la declaratoria, ofreciendo una visión más amplia de los factores

que han cambiado dentro de la vereda; con la participación rural se identificaron los valores compartidos y se logra la construcción del Patrimonio Ambiental y Social del área de estudio, para finalmente formular estrategias que permitan el uso y aprovechamiento sostenible de los bienes y servicios ambientales de la zona de estudio.

Figura 1. Diagrama metodológico.

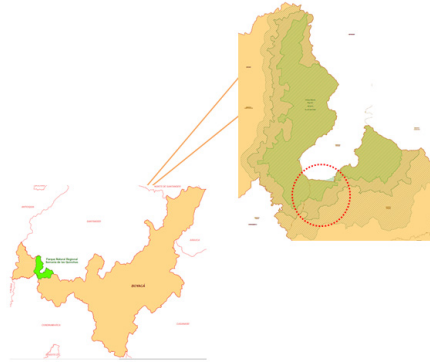


Fuente: Autores.

6.1. Área de estudio.

El Parque Natural Regional Serranía de las Quinchas se encuentra ubicado en el municipio de Otanche en el departamento de Boyacá; la Vereda las Quinchas, cuenta con un 83% dentro del Área Protegida y un 17% en el área de amortiguación, siendo una de las veredas con mayor densidad poblacional; el área de estudio fue seleccionada dada su importancia y ubicación estratégica para el mantenimiento de los bienes y servicios ambientales, así como la conservación de la biodiversidad del Magdalena medio, único relicto de selva húmeda tropical del Departamento descrita por el RUNAP (RUNAP, 2019).

Figura 2. Cartografía Municipio de Otanche, Boyacá.



Fuente: Autores.

6.2. Metodología Corine Land Cover.

Para la implementación de esta metodología se establecieron las siguientes etapas: adquisición y preparación de la información, análisis e interpretación de las coberturas, control de calidad y generación de la capa temática escala 1:100.000. Este modelo ilustra los patrones presentes en el territorio Colombiano por medio de bandas de colores las cuales están clasificadas dependiendo del uso y aptitud del suelo (Cruz Jiménez et al., 2012)

Para el análisis del Patrimonio Ambiental antes y después de la declaratoria de la zona como Área Protegida, se implementó la metodología CORINE (Coordination of information on the environment), esta metodología fue promovida por la Comisión de la Comunidad Europea, la cual permite caracterizar, clasificar, comparar y describir las características de las coberturas de la tierra; para su interpretación, se utilizan imágenes satelitales de resolución media Landsat 4 y Landsat 8, las cuales fueron seleccionadas debido a que se establecen como las más visibles y con menor obstrucción por nubes, permitiendo la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas (Melo & Camacho, 2005)

6.3. Metodología Diagnostico Rural Participativo

Para la construcción del Patrimonio Social, se implementó la metodología de Diagnóstico Rural Participativo (DRP), establecido como un conjunto de técnicas y herramientas que permiten a las comunidades construir el diagnóstico de su territorio a partir de la conformación de significados compartidos y valoración de elementos que consideren esenciales para su desarrollo dando inicio a actividades de auto-gestión de sus recursos. De esta manera, los residentes de la zona pueden compartir experiencias y analizar sus conocimientos, a fin de mejorar sus habilidades de planificación que les permitirán tener una visión más amplia de la biodiversidad con la que cuentan, se identifican falencias entorno a aspectos sociales, culturales y ambientales (Verdejo, 2003). Finalmente, se establece que el objetivo principal del DRP es apoyar la autoevaluación de la comunidad a través de la participación estableciendo factores tanto positivos como negativos de las comunidades para propiciar un desarrollo sostenible (Verdejo, 2003).

7. Resultados.

7.1. Metodología Corine Land Cover

Para determinar los cambios en la cobertura vegetal, por medio de la metodología de Corine Land Cover (Cruz Jiménez et al., 2012), se utilizaron las imágenes Landzat 4-5 y Landzat 8 para los años 2000 y 2018 respectivamente, se tomaron en cuenta estos años debido a la fecha de la declaratoria número 0028, generada en el 2008 por la corporación autónoma de Boyacá (COPOBOYACÁ).

Por medio de ArcGis (completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información

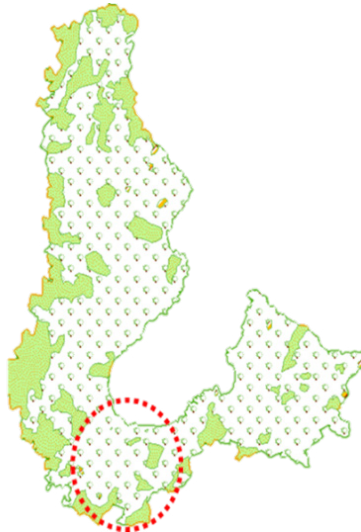
geoFigura), se realizó los shape de cada una de las coberturas dentro de la jurisdicción de la vereda las quinchas, permitiendo determinar el área de influencia de cada cobertura tal como se muestra en la Tabla 2, sirviendo como insumo para la evaluación de los cambios ecosistémicos desde la declaratoria del lugar como área protegida.

Tabla 2. Hectáreas por cobertura vegetal Peque Natural Regional Serranía Las Quinchas.

Cobertura Vegetal	Hectáreas (ha)
Año 2000	
Mosaico de pastos y cultivos	7455.067265
Pastos Limpios	816.6914
Bosque Denso	24959.03914
Año2018	
Bosque Abierto	25162.65301
Pastos Limpios	127.50865
Pastos Arbolados	7941.201666

Fuente: Autores.

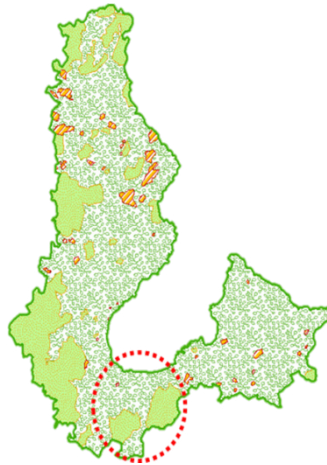
Figura 3. Modelación de coberturas vegetales año 2000.



De acuerdo a lo anterior se evidenciaron las siguientes capas: 75% de Bosque denso, 22% de Mosaico de pastos y cultivos y 3% de pastos limpios, dentro de la zona de amortiguación, donde se evidencia la mayor concentración de mosaico de cultivos para este año, debido a que los residentes de la zona han enfocado sus prácticas económicas en la agricultura, con la producción de cultivos como: Plátano, yuca, maíz, cacao, aguacate y piña; productos maderables de las siguientes especies: Ordinario, Caracolí, Muche y Iguazú (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2016). Estas prácticas han sido el sustento económico de las diferentes familias a lo largo del tiempo, realizadas de manera empírica por Campesinos propietarios, Campesinos poseedores y Aserradores sin tierra, aumentando el crecimiento de la frontera agrícola.

Para el año 2000 se presentó menor porcentaje de bosque denso con respecto al año 2018 figura 3, esto debido a que los residentes de la zona realizaban prácticas agrícolas sin la supervisión y regulación ambiental; a pesar de que para el año 2000 era menor el porcentaje de cobertura boscosa, se evidenció la presencia de biota del Magdalena medio, el cual perduro durante los cambios climáticos ocurridos en periodos geológicos recientes como parte del denominado Refugio Pleistoceno del Carare el cual se ha recuperado desde la declaratoria y que ha permitido el crecimiento y conservación de la biodiversidad (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2016)

Figura 4. Modelación de coberturas vegetales año 2018.



Para el año 2018, se evidencian cambios en la cobertura figura 4 ya que paso de ser Mosaico de pastos y cultivos a ser pastos arbolados; en el caso del bosque se presenta un aumento en el porcentaje de cobertura, paso de tener un porcentaje de 75% a un 76%, en este sentido se evidencia que el bosque, paso de ser un bosque denso a un bosque abierto, indicando que en estas formaciones vegetales se realizó una intervención selectiva pero que no altero su estructura original y las características funcionales (Cruz Jiménez et al., 2012), respecto a los pastos limpios esta capa presenta una disminución considerable, inicialmente presentaba un porcentaje del 3% y paso a tener para el año 2018 un 1%, relacionado directamente con el cambio de actividades de la región.

7.2. Inventario ambiental y cultural

Por medio del análisis tanto del Plan de Manejo Ambiental, la Declaratoria del Área Protegida en el 2008, plataformas como el SIRAP (Sistema Regional de Áreas Protegidas) y Desarrollo de Trabajo de campo, se estableció el Patrimonio Social y Ambiental entorno a la zona de amortiguación del Área Protegida, resaltando

las especies de mayor importancia para interacción ecológica del sistema, determinando una serie de características biológicas importantes dada la presencia de biomas de selva subandina y selva basal en buen estado de conservación y presencia de endemismos locales (Corpoboyacá, 2019). En la Tabla 3 se exponen las especies de flora más representativas de la zona.

Tabla 3. Flora representativa

Nombre Común	Nombre Científico
Especies con buen estado de conservación.	
Canelo	<i>Nectandra globos</i>
Caracolí	<i>Ocotea spp</i>
Cafecillo	<i>Psychotria poeppiginiana</i>
Presencia de endemismos locales.	
Abarco	<i>Caryniana Pyriformis</i>
Caracolí	<i>Anacardium excelsum</i>
Sangre Toro	<i>Virola peruviana</i>
Cedro	<i>Cedrela spp</i>

En cuanto a fauna, se determinaron las especies mas representativas a partir de entrevistas realizadas en trabajo de campo, identificando las especies de mayor relevancia para los pobladores, de igual manera desde el Plan de Manejo Ambiental y la Declaratoria se clasificaron las especies con nombre científico e importancia ecologica, tal como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Fauna representativa.

Nombre Común	Nombre Científico
Oso frontino	<i>Tremarctos Ornatus</i>
Mono nocturno lemurino	<i>Aoutus Lemorinus</i>
Mono Ardilla	<i>Saimiri sciureus</i>
Machín blanco	<i>Cebus albifrons</i>

Ardilla de cola roja	<i>Sciurus granatensis</i>
Perezoso de tres dedos	<i>Bradypus tridactylus</i>
Guanta de tierras bajas	<i>Agouti paca</i>
Oso hormiguero de oriente	<i>Tamandua tetradactyla</i>
Oso hormiguero gigante	<i>Mirmecophaga tridactyla</i>
Armadillo de cola desnuda	<i>Cabassous unicinctus</i>
Ocelote	<i>Felis pardalis</i>
Puma	<i>Puma concolor</i>
Corzuela marrón de La Murelia	<i>Mazama americana</i>
venado cola blanca	<i>Odocoileus virginianus</i>

A partir de una revisión bibliográfica, se estableció la presencia de cuencas, en las que hasta el momento se conservan piezas arqueológicas que permiten establecer que en el lugar se establecieron grupos de los Indígenas Carares (Corporación Autónoma Regional de Boyacá, 2016), lo cual hace que estas fuentes hídricas sean de vital importancia tanto por la prestación de servicios ecosistémicos como la preservación del patrimonio cultural (Tabla 5).

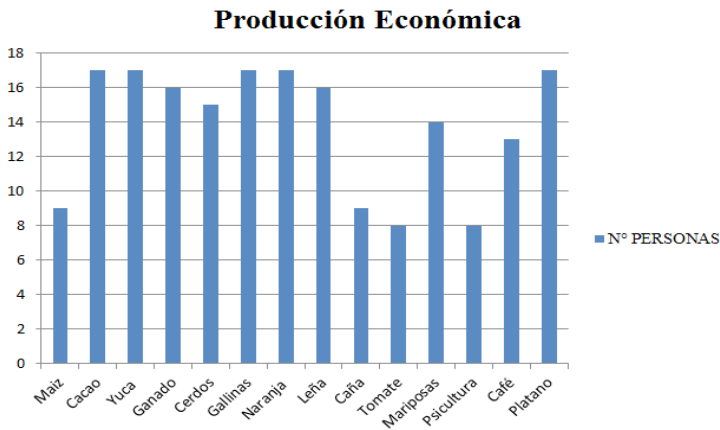
Tabla 5. Fuentes hídricas de importancia cultural.

Fuentes hídricas	Piezas arqueológicas
Ermitaño y Minero	vasijas
Quebrada los Mártires	Urnas funerarias
Dosquebradas	Artefactos Líticos
Las cristalinas	Fragmentos Cerámicos
Las Quinchas	Estatuillas Antropomórficas

7.3. Metodología Diagnostico Rural Participativo

En cuanto al desarrollo del trabajo de campo realizado en la Vereda las Quinchas del Municipio de Otanche en la zona de amortiguación del PNRSQ, se aplicaron 17 encuestas para la caracterización de las condiciones sociales, identificando elementos como: algunas familias continúan realizando prácticas agrícolas tanto en la zona de amortiguación como en el área estrictamente delimitada de protección, se desarrollan actividades ilegales como la tala de árboles y la minería; dado que el acompañamiento desde la Declaratoria de la zona por parte de la Corporación Ambiental y entidades gubernamentales ha sido escaso se evidencia la falta de estrategias de desarrollo que permitan modificar las prácticas convencionales.

Figura 5. Actividades economicas de la población.



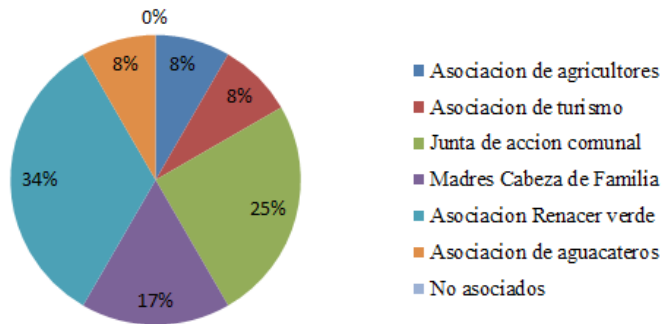
De acuerdo a los resultado se observo que la mayoría de familias de la zona se dedican a la producción de cultivos de plátano, cacao, yuca, naranja y cria de gallinas como se puede observar en la figura 5; se identifico que la practica de actividades excluidas para la zona de amortiguación en la formulación del Plan de Manejo como la cría de cerdos y ganado se continuan desarrollando, generando con esto el uso insostenible de los

recursos. Finalmente se evidencia la implementación de zoo criaderos en la zona de estudio, que si bien es cierto contribuyen en el aumento de la biodiversidad, también carecen de licencias ambientales para su correcta ejecución.

En los talleres que se desarrollaron desde la metodología de Diagnostico Rural Participativo, se encontro como elemento caracteristico la generación y crecimiento de asociaciones, la mayoría de familias hacen parte de asociaciones productivas, las cuales han propiciado aumento de capacitación y acercamiento a estrategias para el uso sostenible de los Recursos Naturales. En la figura 6 se establecen las diferentes asociaciones presentes en la zona y el porcentaje de participación de familias en las mismas.

Figura 6. Instituciones mas importantes para el desarrollo de la comunidad.

Institución más importante para el desarrollo de la comunidad.



Se determinó que el mayor porcentaje de la población encuestada se encuentra vinculada a la asociación de agricultores, con un porcentaje del 8 %, esto debido a la aptitud de uso del suelo, tanto por el componente de biodiversidad como de precipitación, siendo esta actividad el único sustento económico. Por otro lado, se establece la presencia de la Asociación Renacer Verde la cual tiene el mayor porcentaje de familias adscritas con un

34 % ya que la comunidad durante el proceso de declaratoria e incorporación del Plan de Manejo Ambiental, encontraron en la Zoo cría una estrategia de Desarrollo Sostenible que les ha permitido diversificar sus ingresos.

8. Estrategias de mejora.

Debido a los elementos identificados durante la Construcción del Patrimonio Social y Ambiental, se establece que la población cuenta con algunas falencias dentro de su estructura social y desarrollo económico lo que permite proponer algunas estrategias que pueden ser incorporadas durante los procesos de Planificación territorial.

Para el aspecto socio-económico de la comunidad se propone:

1). Fomentar la consolidación y uso de un inventario de fauna y flora que permita a los residentes de la zona que se encuentran vinculados a la asociación de turismo ofrecer su patrimonio ambiental y cultural como atractivo turístico 2). Incentivar el trabajo conjunto con los integrantes de juntas de acción comunal que permitan mejorar el acceso a los servicios públicos domiciliarios 3). Hacer partícipe a las asociaciones en la creación de un plan de turismo que incluya sus productos para la venta y producción sostenible 4). Gestionar apoyo por parte de la alcaldía para proyectos que permitan mitigar los fenómenos de pobreza y la reducción del uso insostenible de los recursos de la Región.

Para el aspecto ambiental se propone: 1). Generar talleres de educación ambiental sobre el uso sostenible de los bienes y servicios ambientales, 2). Realizar acompañamiento a las asociaciones de agricultores por medio de personal capacitado en temas de agricultura, para mitigar el uso de insecticidas que puedan dañar la zona de reserva, con el fin de promover el uso de productos amigables con el ambiente, 3). Mejorar las prácticas convencionales por medio de la adquisición de permisos por

parte de la Corporación Ambiental Corpoboyacá, que permitan el manejo de zootecnia dentro de la reserva

9. Conclusiones

De acuerdo a la información analizada por medio de la metodología Corine Land Cover, se determinó que la declaratoria generada en el 2008 mediante el acuerdo 0028 aportó a la restauración y conservación de algunos sectores, para este análisis se determinó que la vereda las Quinchas cuenta con un porcentaje del 76% de bosque fragmentado, un 1% de pastos limpios y un 24% de pastos arbolados para el año 2018, lo cual permite establecer que después de la declaratoria se generaron procesos de restauración parcial de las coberturas vegetales ya que para el año 2000 presentaba 75% de bosque denso, 22% de cobertura de mosaico de pastos y cultivos y 3% de pastos limpios; reemplazando la aptitud de uso de suelo para cultivos por sectores en donde se inició la restauración de siembra de árboles dándole paso a la cobertura vegetal de pastos arbolados.

Por otra parte, con la revisión del Plan de Manejo Ambiental y la perspectiva del mismo en la comunidad, así como en el desarrollo de las actividades propias de la Metodología de Diagnóstico Rural Participativo, se evidencia que en algunos sectores de la zona de estudio, actualmente se continúan generando actividades prohibidas por las características propias del Área Protegida, lo que lleva a sugerir que se requiere incorporar tanto los elementos Tecnológicos para el estudio de la biodiversidad como la inclusión y el trabajo en conjunto con las comunidades, para finalmente encontrar las mejores estrategias de Planificación de la vereda donde se incluyan los elementos propios tanto del Patrimonio Ambiental como del Patrimonio Social de la región.

Es importante tener en cuenta que para la generación de estrategias para el acompañamiento de nuevas prácticas de desarrollo económico es indispensable la participación de la comunidad, ya que esto permite la articulación de los saberes tradicionales que por generaciones han practicado, dando paso a una nueva propuesta de desarrollo económico sostenible, pero sin dejar a un lado sus costumbres, lo cual permite que las comunidades no se sientan afectadas por estas declaratorias si no se den cuenta que, pertenecer a un área protegida es un privilegio ya que su buen manejo permite tener beneficios tanto económicos como de confort ambiental.

Mediante las actividades de trabajo social comunitario, se determinó que las comunidades ya emplean dentro de sus prácticas culturales y económicas el termino sostenibilidad, y están dispuestos tanto a recibir capacitaciones como a la generación y desarrollo de nuevas ideas y estrategias que si bien es cierto deben influir en el mejoramiento de sus condiciones económicas, también deben buscar la protección de los Recursos Naturales y la conservación del Patrimonio Cultural de la Región.

Finalmente se establece que la vereda las quinchas la cual tiene una posición estratégica dentro de la zona reserva, necesitan más acompañamiento de los entes gubernamentales, permitiendo la articulación de las asociaciones con las que cuenta esta región ya que por medio del acompañamiento económico, publicitario y social, permiten que estas comunidades den a conocer los bienes y servicios ambientales con los que cuenta promoviendo el desarrollo económico sostenible.

Capítulo 9

El aire que respiramos los colombianos: Relación entre contaminación y salud de 2010 a 2020 y en época de pandemia⁹

The air we colombians breathe: Relationship between pollution and health from 2010 to 2020 and during pandemic times

⁹ Autores: Guarín Durán, César Augusto Universidad Autónoma Metropolitana. Mexico-Acevedo Suarez, Luis Fernando, Vega, Lina Patricia. Universidad Santo Tomás. Seccional Tunja. Colombia

RESUMEN

Las infecciones respiratorias agudas (IRA) son un grupo de enfermedades causantes de altas tasas de morbilidad y mortalidad, convirtiéndose en un problema de salud pública que hay que atender. Las IRA son causadas por patógenos (virus, bacterias o parásitos) presentes en el aire, los cuales afectan el sistema respiratorio, especialmente en niños menores de cinco años y adultos de la tercera edad. Este capítulo revisa la calidad del aire de Bogotá y de 15 ciudades colombianas. Analiza diversos datos en una serie de tiempo del año 2010 al 2019, buscando determinar el impacto en salud y estudiando correlaciones entre el aire que respiran los colombianos y las afectaciones en morbilidad y mortalidad por COVID 19. Considerando modelos previos usados en otros países (China, Italia, Brasil, Estados Unidos, Argentina y Chile) y mediante metodologías de dosis-respuesta se determinó el efecto de los contaminantes sobre la morbilidad y mortalidad por IRA y COVID 19 a corto y largo plazo. Los modelos multivariados desarrollados muestran que las variables de más peso estadístico están relacionadas con enfermedades preexistentes, hábitos de salud, condiciones socioeconómicas, meteorológicas y ambientales, resaltando que el O_3 y el PM_{10} son los de mayor impacto.

PALABRAS CLAVE

Contaminación, Infecciones respiratorias agudas, COVID-19, funciones dosis-respuesta, salud en Colombia, Análisis de regresión multivariada.

ABSTRACT

Acute respiratory infections (ARI) are a group of diseases causing high rates of morbidity and mortality, thus becoming a public health challenge to tend to. ARI's are caused by pathogens (viruses, bacteria or parasites) present in air, affecting the respiratory system, especially in children younger than five years old and senior adults. This chapter examines the air

quality in Bogotá and another 15 Colombian cities and towns. It also analyzes time-series data from 2010 to 2019, aiming to determine the impact of air quality on human health and studies correlations between the air breathed by Colombian residents and consequences on morbidity and mortality by COVID-19. Considering previous models used in the study of other countries (China, Italy, Brazil, United States, Argentina and Chile) and via dose-response methodologies, the short- and long-term effect of the pollutants on morbidity and mortality rates by ARI and COVID-19 was determined. Multivariate models worked out in this text determined that the variables with the most statistical weight are connected to preexisting conditions, health habits, as well as socioeconomic, meteorological and environmental conditions, the most impactful instances of the latter being O_3 and PM_{10} .

KEYWORDS

Pollution, Acute respiratory infections, COVID-19, dose-response functions, health in Colombia, Multivariate regression analysis.

1. Introducción

El estilo de vida moderno, el crecimiento de la población y la necesidad de usar recursos para subsistir, junto con la constante extracción y los procesos de transformación de materias primas para agricultura, industria y minería (IDEAM, 2018) tienen como efecto la generación de contaminantes en el aire, suelo y agua (Manahan S.E., 2007). Particularmente, la contaminación atmosférica es un serio problema actual, y aunque su efecto más marcado es el calentamiento global (Hoegh-Guldberg et al., 2018), no es menos importante lo relacionado con el deterioro de la salud humana y en general de los ecosistemas. Entendiendo el término contaminante atmosférico como cualquier sustancia que en el aire ambiente sobrepasa los límites naturales permisibles, después de los cuales genera daños a cualquier organismo (Manahan S.E., 2007), se comprende porque diversos estudios buscan analizar cómo diferentes sustancias afectan la salud de los grupos poblacionales. En el aire ambiente los contaminantes se encuentran en fase gas o sólida (partículas), y generalmente están presentes como mezclas de sustancia orgánicas o inorgánicas que poseen diferentes tamaños, composición y geometrías. Tal vez los contaminantes más conocidos por todos sean los gases de efecto invernadero como el CO₂ o el metano, pero existen otras sustancias como el ozono y el material particulado cuyo efecto nocivo en el organismo es más potente que los anteriores, en función de su tamaño y composición (Morales-Bárceñas et al., 2015). Es preocupante constatar que varios estudios muestran

que existe un vínculo entre las crecientes cifras de morbilidad y mortalidad y el deterioro del aire que respiramos, ejemplo de esto lo tenemos en países de Asia y el Pacífico Occidental donde la creciente industrialización ha vertido toneladas de contaminantes a la atmósfera, cuyo efecto negativo ha sido el aumento de enfermedades respiratorias (OMS, 2018).

¿Qué tan relacionados están las enfermedades respiratorias con el tipo de aire ambiente que respiramos? La respuesta puede empezar a encontrarse en la literatura especializada, donde diversos estudios epidemiológicos han buscado esclarecer cuáles son los efectos concretos que causan los contaminantes (gases y partículas) en la salud, sobre todo cuanto existe exposición recurrente durante periodos de tiempo cortos y largos (GRAHAM, 1990). Se estima que casi 60 millones de personas mueren al año como efecto de diversas enfermedades respiratorias que se agravan por la exposición a contaminantes (Mannucci & Franchini, 2017). En el año 2016 la OMS informó que el material particulado con tamaño de 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$) fue el principal causante de la reducción de las funciones pulmonares y de agravar enfermedades como asma, EPOC (enfermedad pulmonar obstructiva crónica), catarro, etc, generando 4,2 millones de fallecimientos en el mundo. Lo alarmante de la situación es que para esta organización cerca del 91% de los habitantes del planeta habitan en regiones donde la concentración de los contaminantes atmosféricos sobrepasa los límites permisibles. Aunado al aumento de la concentración de contaminantes por actividades antropogénicas, el problema de la mala calidad del aire se exagera en diversas ciudades y regiones debido a las condiciones meteorológicas y oroFiguras, por ejemplo, debido a inversiones térmicas y de masas de aire, irradiación intensa en alguna época del año, bajas velocidades de los vientos, frentes fríos o la presencia de valles, todo lo anterior tiene como efecto la poca ventilación de los contaminantes atmosféricos (IDEAM, 2017). Una máxima a tener en cuenta es que a mayor tiempo de residencia de los contaminantes mayor

es la peligrosidad de éstos para la salud humana, en especial para aquellas personas que hacen parte de un grupo vulnerable (Andrea Rodríguez Villamizar et al., 2010).

En el caso particular de las principales ciudades colombianas, las mediciones de contaminantes atmosféricos en estaciones de monitoreo muestran datos que generalmente están por encima de los límites permisibles. Esto se mostrará más adelante a lo largo del capítulo. Respecto a los reportes para enfermedades respiratorias agudas (IRA) y crónicas (ERC) que son publicados por Instituto Nacional de Salud (INS) de Colombia, el año 2019 se evidenció una pequeña baja en la cantidad de casos de morbilidad y mortalidad en todo el país si se comparan con el promedio anual obtenido para el intervalo de años entre 2012 y 2018. Sin embargo, es alarmante constatar que en Colombia se registra poco más de 10000 personas fallecidas al año a causa padecimientos relacionados con enfermedades respiratorias y contaminación del aire ambiente.

Se ha detectado que las áreas urbanas contaminadas son un escenario nocivo para los ciudadanos, ya que éstos están expuestos a respirar gases y partículas, por ejemplo, las que provienen de los motores de combustión, los cuales han sido identificados como la principal fuente de emisión de contaminantes primarios (Isaza et al., 2019). Entre los ciudadanos más afectados se han identificado como grupos de riesgo a los niños menores de 5 años y a los adultos mayores de 60 años, siendo Antioquia el departamento que muestra la mayor cantidad de casos (INS, 2019). Las tasas de morbilidad y mortalidad en el país se han visto incrementadas por causa de las elevadas concentraciones de contaminantes en el aire, el material particulado PM (por sus siglas en inglés) con diámetro menor a 2,5 micrómetros ha sido evidenciado como el que más afecta la salud por su capacidad de llegar hasta los pulmones (bronquiolos y alveolos) y alterar el intercambio de gases. Las fuentes móviles son las principales generadoras de las emisiones de este contaminante PM, por

ejemplo, en el Valle de Aburrá el 79% de éste es emitido por fuentes a Diesel.

En 2016 se midió en este Valle concentraciones de PM_{10} mayores en un 26% respecto a los límites permisibles de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ determinados por la OMS, y sabiendo que este contaminante es generado constantemente y que también, vale la pena decir, la deficiencia de la normatividad está involucrada indirectamente en las altas tasas y persistencia del mismo (Isaza et al., 2019), no es descabellado pensar en su relación con las enfermedades respiratorias. Respecto a esto, para el periodo comprendido entre los años 2007 a 2016 se calcularon las tasas de mortalidad en población menor a 30 años de edad y la cantidad de afecciones cardio-respiratorias causadas por exposición recurrente a un aire ambiente contaminado (Aguiar Gil, 2020). Para finalizar, se resalta que son estas partículas las que más deterioran la salud afectando cerca del 75% de la población total colombiana.

Visto todo lo anterior, pasaremos a mostrar en lo que sigue del escrito, algunos resultados acerca de la influencia y correlación que existen entre los datos de contaminantes atmosféricos cuantificados en varios países y algunas ciudades de Colombia y las enfermedades respiratorias reportadas en los últimos años (incluyendo la afectación por COVID-19). El capítulo continuará con la revisión de los trabajos hechos sobre calidad el aire y salud para escenarios internacionales, pasando luego a mostrar resultados de trabajos previos hechos en Colombia. Finaliza con los resultados encontrados sobre contaminación y modelos de correlación, recogiendo las ideas derivadas de estos en las conclusiones.

2. La situación respecto al aire que respiramos

En el presente capítulo queremos enfatizar sobre la existencia del vínculo entre la contaminación del aire y el deterioro de la salud, analizando datos medidos en estaciones atmosféricas en varias ciudades colombianas en los últimos 10 años y contrastándolos con varios aspectos sociales, demográficos y de enfermedades respiratorias. A pesar de lo relevante del tema, hay contadas investigaciones a nivel nacional que tratan sobre la correlación entre la mala calidad del aire y las enfermedades respiratorias, destacando según nuestro conocimiento, algunos trabajos como los de (García et al., 1996) en la ciudad de Cali, el de (Aguiar Gil, 2020) de la Universidad de Antioquia, el de (Herrera, 2017) de la Universidad de los Andes, y el de (Rodríguez-Villamizar et al., 2020) en la Universidad Industrial de Santander. Con este capítulo queremos acumular más evidencias para reforzar este tipo de información, revisando la literatura y mostrando algunos resultados de un estudio reciente desarrollado en la Universidad Santo Tomás (Acevedo, 2021). Creemos que a la larga este escrito servirá como parte del acervo de ideas y recomendaciones para que los tomadores de decisiones tengan una base científica, en línea con el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), que les sirva para implementar políticas más estrictas de control de contaminantes atmosféricos y cuyo efecto sea una repercusión positiva en la disminución de la morbilidad y mortalidad por enfermedades respiratorias.

Recordemos que los ODS consisten en 17 objetivos interrelacionados (PNUD, 2020) que fueron creados en el año 2015 con el fin de poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz. En el año 2018 en Ginebra Suiza se celebró la primera conferencia mundial sobre

contaminación atmosférica y salud, donde se evidenció que aproximadamente solo el 9% de la población mundial respira un aire de buena calidad, ya que en muchos casos se superan los valores máximos permisibles y lo que es peor, hay situaciones donde se registran concentraciones de contaminantes 10 veces por encima de la norma, produciendo así cerca de un tercio de las muertes a nivel mundial por enfermedades relacionadas a la exposición a un ambiente contaminado (OMS, 2018).

Según (Rayén Quiroga, 2016) las estadísticas ambientales son el pilar más débil del desarrollo sostenible, esto debido a la falta de datos de buena calidad y a la desactualización de éstos a escala mundial. Así, cerca de siete ODS y 103 de los indicadores requieren datos ambientales significativos. Particularmente, en Colombia hay varios problemas respecto al monitoreo, efectos y conocimiento del impacto de la contaminación en la salud de la población. Por ejemplo, el sector agropecuario es el principal generador de gases de efecto invernadero y no hay políticas estrictas para disminuir esas descargas. Sumado a esto, la falta de recursos económicos para obtener una mejor educación tanto ambiental como sobre el cambio climático en el país (Herrera F et al., 2018), el incremento de la industria automotriz y el uso de energías fósiles son realidades que agravan el problema. Estos últimos son productores de altos volúmenes de contaminantes atmosféricos, y por lo tanto de mayores afectaciones y empeoramiento de enfermedades respiratorias en la población (Clean air institute & Área metropolitana valle de Aburrá, 2017). Por ello se pretende resaltar, cuantificar y dar a conocer en este capítulo, si existe o no una relación estrecha entre la calidad del aire y las tasas de letalidad y mortalidad generadas por enfermedades respiratorias y también por el COVID-19 en Colombia. Adelantamos una respuesta afirmativa para esta relación, lo cual se corrobora con las evidencias encontradas tanto en países como China, Estados Unidos, Inglaterra, Italia y Países bajos para este tipo de análisis (Félix-Arellano et al., 2020) y por lo mencionado por la Sociedad Europea de Cardiología

(ESC-European Society of Cardiology), que dice que cerca del 15% de los fallecidos a nivel mundial por enfermedades del corazón, tuvieron un influjo directo con la exposición prolongada a una atmósfera contaminada.

2.1. Escenarios internacionales

La influencia de las actividades antropogénicas en el clima global y local ha llevado a un creciente deterioro del aire ambiente principalmente en megaciudades. Su efecto visible es el deterioro de la calidad de vida del ciudadano de a pie afectando su salud y haciendo que disminuya su esperanza de vida media (Ángel Macías & Gallini, 2019). Las causas más sobresalientes sobre la calidad del aire están relacionadas con el crecimiento demográfico, el cambio en el uso del suelo, las expectativas personales de progreso y el desarrollo económico. Es importante resaltar que en varios estudios se ha teorizado que la exposición a un aire ambiente contaminando, impacta negativamente por deterioro de la salud de las personas que presentan alguna enfermedad respiratoria. Además, se plantea que diversos virus pueden ser transportados por medio del material particulado como también por gotas y microgotas expulsadas al respirar, así como por aerosoles presentes en el aire ambiente (Meselson, 2020). Esto ha sido corroborado por datos históricos de enfermedades como la gripe aviar, el síndrome respiratorio agudo grave, el síndrome respiratorio por coronavirus de oriente medio, y actualmente la pandemia causada por el SARS-CoV-2 (Rosselli, 2020). En lo que sigue del presente capítulo del libro se revisaran algunos trabajos sobre la relación entre enfermedades respiratorias y calidad del aire hechos en varios países. Se revisarán algunos casos del viejo continente, Norteamérica y Latinoamérica, para pasar después a centrarnos en la discusión sobre lo que está sucediendo en varias ciudades colombianas respecto al tema de calidad del aire y salud.

2.1.1 Casos estudio en China

Para nadie es un secreto que el acelerado crecimiento de China como potencia económica, ha generado uno de los peores escenarios mundiales de contaminación del aire ambiente que respiran sus ciudadanos. La explotación de recursos, la quema de carbón, el creciente número de vehículos, entre otros, han influido negativamente en la salud de los habitantes en ese país, al punto que entre los años 1990 y 2015 se encontró un incremento de mortalidad prematura debido a la presencia de material particulado $PM_{2.5}$ (Matus et al., 2011). Un estudio realizado por (Liu et al., 2020) en China, reveló que para el año 1990 hubo cerca de 1,26 millones de fallecimientos, los cuales estuvieron vinculados con la pésima calidad del aire, mientras que para el año 2015 esa cifra casi se duplicó, llegando al alarmante dato de 2,18 millones en ese país. En 1990 la concentración promedio de $PM_{2.5}$ a nivel nacional fue de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para el 2015 fue de $63,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Liu y colaboradores identificaron a los sectores industrial, residencial, agrícola, de transporte y de energía como los causantes de la emisión de PM. Para estos sectores se asignaron factores de emisión y se construyó el inventario de emisiones clasificando varios contaminantes evaluados para el periodo de estudio. Por medio de la aplicación de un modelo de mortalidad por exposición global, los autores estimaron las posibles muertes generadas por exposición constante al $PM_{2.5}$ y proyectadas para el año 2015.

En otro estudio realizado por (Han et al., 2018) en 155 ciudades de China se analizó la posible correlación existente entre datos de monitoreo de la calidad del aire y afectaciones en la salud de la población. Se usó datos de concentraciones horarias para los gases y partículas causantes de la contaminación del aire, los cuales fueron obtenidos en las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire de China durante el año 2014. En dicho estudio se investigó material particulado (PM), Dióxido de nitrógeno (NO_2), Dióxido de azufre (SO_2) y Ozono (O_3), y se usaron tanto los promedios diarios como los anuales. La población de

276 millones fue dividida según la cantidad de habitantes de las ciudades, cuyos datos se midieron en el censo de población Chino de 2010. Por medio de un análisis estadístico se evidenció que aproximadamente la mitad de la población estuvo expuesta a concentraciones de contaminantes que sobrepasaron los límites permisibles establecidos por la OMS, siendo peligrosas para los habitantes de las grandes ciudades durante periodos de 110 y 146 días en el transcurso del año. Se determinó que la enfermedad más recurrente en la población es la EPOC causada por exposición constante a material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}). El estudio también demostró que se mantiene la prevalencia de enfermedades causadas por otros gases como el O_3 , SO_2 y NO_2 , donde el primero disminuye la función pulmonar en humanos, el segundo causa deficiencia en la respiración generando silbidos en el pecho en pacientes con asma y el último genera en varias personas casos de bronquitis crónica. Como dato importante se menciona que para las ciudades con población inferior a 10 millones de habitantes las concentraciones de contaminantes no sobrepasaron los límites permisibles. El estudio finaliza comentando que la mala calidad del aire ambiente donde coexisten varios contaminantes está constantemente presente en las ciudades chinas. Esto implica un impacto negativo en la población y por lo tanto se requiere un cambio urgente en las políticas para frenar el deterioro de la salud de los ciudadanos (Han et al., 2018). Aunque en dicho país se han creado distintos planes para lograr una mejor calidad del aire esto no ha sido posible a corto plazo, y según (Duan et al., 2020) se requiere implementar políticas más restrictivas.

Un último caso de interés para el tema que estamos tratando está relacionado con un estudio comparativo en 120 ciudades de China (excluyendo ciudades de pocos contagios y Wuhan por ser el epicentro del SARS-CoV-2), el cual buscó correlaciones entre la concentración de seis contaminantes ($PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO y O_3), datos meteorológicos (temperatura, humedad relativa, presión en la atmósfera y velocidad de vientos) y la

tasa de infecciones por COVID-19. El estudio empleó datos de casos confirmados de contagios y de fallecimientos por el virus SARS-CoV-2, obtenidos entre el 23 de enero y el 29 de febrero de 2020. Los autores analizaron por medio de modelos aditivos generalizados el efecto de cada uno de los contaminantes y también la sinergia de los mismos. Encontraron correlaciones significativas (usando el software libre R versión 3.5.2) entre la contaminación del aire ambiente y el aumento de casos positivos por COVID-19 en dicho país (Zhu et al., 2020).

2.1.2 Casos estudio en Italia

En la ciudad de Milán, Italia, el estudio de (Zoran et al., 2020) mostró la existencia de correlaciones entre los contaminantes el $PM_{2.5}$ y PM_{10} y la morbilidad a causa de COVID-19. La serie de tiempo investigada contenía datos desde el 1 de enero al 30 de abril del año 2020. Los autores emplearon variables meteorológicas, concentración de material particulado, altura de la capa de mezcla, temperatura, velocidad de los vientos, y por medio de modelos estadísticos, encontraron correlaciones significativas (destacado la encontrada entre el aumento de la temperatura y la disminución de la humedad relativa contra los datos reportados de COVID-19) entre la calidad del aire ambiente y los incrementos de contagios y fallecimientos por COVID-19. El estudio hace eco de que la exposición recurrente a PM causa disminución en la respuesta inmune del individuo contra infecciones virales, haciéndolo más propenso a presentar cuadros clínicos severos.

En otra investigación desarrollada en las ciudades de Bérgamo, Milano y Brescia durante el año 2020, se estudió el posible vínculo existente entre los gases CO, NO_x, O₃, SO₂, NH₃ y COVs (compuestos orgánicos volátiles) así como el PM, y la morbilidad por COVID-19. Los datos de dichas ciudades mostraron niveles elevados en la cantidad de contaminantes atmosféricos respecto a la norma de la OMS. La serie de tiempo usada comprendía

los meses de enero y febrero de 2020 y contenía datos climatológicos, casos positivos de contagio y número de muertes producidos por COVID-19. Todas estas variables se analizaron con ORIGIN10 encontrando que la exposición a corto y a largo plazo a un aire ambiente de muchos contaminantes puede generar enfermedades del sistema respiratorio. Se encontró así una alta correlación entre el contagio del virus y el aire contaminando. Mediante muestras de pacientes se encontraron micropartículas en los alvéolos y se identificó la enzima ACE2 encargada de romper la pared celular para la posterior replicación del virus. También en la ciudad de Bérgamo (Comunian et al., 2020) el estudio de (Setti et al., 2020) encontró que en el aire ambiente existe material genético del virus causante del COVID-19.

2.1.3 Caso estudio en los Estados Unidos de América

En los Estados Unidos de América se realizó un estudio que buscaba determinar la relación entre la calidad del aire y la incidencia de contagios y fallecimientos por COVID-19. Esta investigación se realizó para 3000 condados y contó con datos de diversa índole. Se usaron datos de material particulado, información social, nivel de educación, nivel de ingresos, estrato social, y datos provenientes de hospitales a saber, número de camas, brotes, casos graves, etc. También se recopilieron datos que contenían cantidad de contagios y fallecimientos por COVID-19 hasta la fecha del 22 de abril de 2020. Todos los datos se analizaron por medio de un modelo mixto bimodal negativo, escogiendo 20 factores con 68 análisis de sensibilidad. Los resultados del estudio mostraron factores muy similares a los estudios realizados en China, y con el modelo de regresión de Poisson para algunos datos de conteo. No se incluyeron ciudades con contagios menores a 10 personas ni la ciudad de Nueva York por poseer las cifras de contagios más altas del país. La conclusión de dicho estudio indica que por cada 1 g/m^3 de $\text{PM}_{2.5}$ se produce un aumento del 8% en fallecimientos relacionados con SARS-CoV-2, aunque se mencionó que es necesario hacer

más estudios con datos individuales y no colectivos para lograr una mayor precisión (Wu et al., 2020).

2.2 Escenario latinoamericano

Dentro del escenario latinoamericano se han realizado algunos estudios relacionados con calidad atmosférica y salud de la población, destacando tres de éstos desarrollados en Chile, Argentina y Brasil. El estudio de Ubilla y colaboradores en Chile investigó cual era el impacto causado por la contaminación en grupos de niños. Los autores encontraron que la calidad del aire es un factor principal en las tasas de letalidad y gravedad de enfermedades respiratorias en este grupo poblacional a causa del poco desarrollo del sistema respiratorio que presentan, así mismo por la realización de actividades físicas en espacios abiertos como parques, su cercanía al suelo y la presencia de contaminantes atmosféricos a bajas alturas, siendo el material particulado, los dióxidos de azufre y de nitrógeno los de mayor presencia causando afectaciones de salud (Ubilla & Yohannessen, 2017).

En Argentina se realizó un estudio comparativo entre la información obtenida en la superficie terrestre por estaciones de monitoreo atmosférico dentro de los años 2012 y 2016, igualmente para imágenes satelitales tomadas por el Instrumento de Monitoreo de Ozono (OMI, por sus siglas en inglés), utilizando el modelo estadístico de Spearman para la relación entre los datos, optando por factores bajos (0,15) para la media diaria y moderados (0,3) para la media mensual, con lo cual no se encontraron datos muy dispersos. Cabe resaltar que dentro de este modelo no se tomaron valores para las incertidumbres para evitar errores (Represa et al., 2019).

En Brasil, el país de mayor superficie en Latinoamérica, se estudió la relación entre la calidad atmosférica y las enfermedades respiratorias en las ciudades de Duque de Caixa y Petropolis

(estado de Rio de Janeiro), obteniendo datos de las estaciones de monitoreo atmosférico presentes en el área de estudio, casos hospitalarios por problemas respiratorios y algunos parámetros meteorológicos como precipitaciones, temperatura y humedad. Con la ayuda del modelo estadístico de Spearman se encontró una relación significativa entre dichos factores, siendo el material particulado y dióxido de nitrógeno los de mayor presencia por causa de la quema de combustibles fósiles en la zona industrial (Jr & Rocha, 2020).

2.3 Escenario nacional

Para este escenario algunas de las ciudades estudiadas han sido Cartagena y Bogotá además del municipio de Ráquira (Boyacá). Sánchez y colaboradores realizaron para Cartagena en el año 2013 un inventario de contaminantes atmosféricos en intervalos de tiempo entre cinco a 12 días que gradualmente se convertirían en anuales. Los autores encontraron que los contaminantes criterio (excluyendo al material particulado) no presentaban concentraciones por fuera de los límites establecidos por la legislación nacional, mencionando que no se presentaron alteraciones por condiciones meteorológicas por lo que recalcan que los entes gubernamentales deben prestar mayor control sobre las fuentes de emisión (Sánchez et al., 2013). El Municipio de Ráquira se ha caracterizado a lo largo de los años por su industria alfarera la cual es causante del deterioro de la calidad atmosférica en esta zona. Debido a esto se monitorea constantemente el aire ambiente, en especial las concentraciones de material particulado ya que se observa prevalencia de enfermedades respiratorias como asma, rinofaringitis y EPOC causadas por dichos contaminantes. También, se investigó la relación de dichos factores mediante el modelo de Pearson, evidenciando una relación proporcional entre enfermedades respiratorias y concentración de dichos contaminante (Rico Melo & Torres Salcedo, 2018). Otro municipio con características

similares en cuanto a fuentes de emisión es Sogamoso, en el cual se realizó un estudio para determinar la presencia de metales pesados y la concentración de estos en la atmósfera, encontrado que sus fuentes de emisión son las distintas industrias del sector. Estos contaminantes son causantes de las enfermedades respiratorias que padecen las poblaciones aledañas, y se agravan por efecto de las condiciones topográficas de la zona. Para la investigación los autores utilizaron la metodología de la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) con la cual se determinaron los contaminantes atmosféricos presentes y se contestó a la pregunta de la no correcta dispersión de éstos (Rico Hernández et al., 2015). Bogotá, la ciudad capital de Colombia, presenta diversidad de estudios motivados por dar solución a las problemáticas atmosféricas que se ven a diario a causa de los contaminantes atmosféricos como el $PM_{2.5}$, causante de enfermedades cardio-respiratorias. El estudio realizado por Rodríguez y Camargo entre el año 2014 y 2015 donde se tomaron muestras con una frecuencia de seis horas, mostró que, con las concentraciones alcanzadas, las tasas de morbilidad y mortalidad por enfermedades respiratorias habría incrementado en un 9%, y habían rebasado los objetivos intermedios para $PM_{2.5}$ propuestos por la OMS (Rodríguez-Camargo et al., 2020) como guías de calidad del aire. En esta misma ciudad, en la localidad de Kennedy, se realizó un estudio con la metodología dosis-respuesta para determinar el valor económico de la atención a la salud por causas de contaminación atmosférica, determinando que para atender a un paciente con dichas características se necesitarían 969.48 dólares estadounidenses y que si llegase a presentar un incremento de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las concentraciones atmosféricas de PM_{10} se necesitaría más recursos económicos para atender al número de pacientes que aumentaría que sería aproximadamente de seis por cada 10 de aumento en la concentración (Herrera, 2017).

3. Metodología

3.1. Datos sobre calidad del Aire

Para este trabajo, se recopilaron y analizaron datos de calidad del aire en Colombia en el periodo comprendido entre 2010 y 2020, para Bucaramanga y su área Metropolitana; el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA); Sogamoso (Boyacá), Cali, Barranquilla, Santa Marta, Villavicencio y Bogotá. Se escogieron estas ciudades por tener mayor cantidad y calidad de datos. La información se obtuvo del Sistema de Información Sobre Calidad del Aire, SISAIRE (IDEAM, 2021a) que recopila la información meteorológica y de calidad del aire del país. Se utilizó el Índice de Calidad del Aire (ICA), definido en la resolución 2254 de 2017, para ubicar los contaminantes en los rangos allí definidos (Resolución 2254, 2017). En la Tabla 1 se muestran resumidamente las estaciones por ciudad y el tipo de información encontrada.

Tabla 1. Lugares, estaciones y tipo de información de calidad del aire utilizada

Área	Número de estaciones	Rango de fechas	Parámetros	Fuente
Área Metropolitana de Bucaramanga	Bucaramanga: 3, Girón: 1 Floridablanca: 2	2005-2020: Promedios diarios y anuales	PM _{10r} , PM _{2.5r} , O ₃ y NO _x	(IDEAM, 2021a) (AMB, 2019)
	13 Localidades: Usaquén, Tunjuelito, Suba, San Cristóbal, Puente Aranda, Santa fe, Engativá, Fontibón, Kennedy, Chapinero y Barrios Unidos	2010-2020: SISAIRE: Promedios diarios y anuales	PM _{10r} , PM _{2.5r} , CO, O ₃ , NO _x , SO ₂ y CO ₂	(IDEAM, 2021b) (Mapa de calidad del aire de Bogotá, 2021) (RMCAB, 2020)

Valle de Aburrá	6 Municipios: Barbosa, Bello, Caldas, Girardota, Itagüí y Medellín	2005-2019: Promedios diarios y anuales. 2020: Datos horarios	PM _{10'} , PM _{2.5'} , O _{3'} , CO y NO _{x'}	(IDEAM, 2021b) (SIATA, 2020)
Sogamoso	3	2005-2019: Promedios diarios	PM10, PM2.5, CO, O _{3'} , NO _x , y SO ₂	(IDEAM, 2021b) (CORPOBOYA-CÁ, 2020)
Santa Marta	3	2005-2019	PM _{10'} , PM _{2.5'} y O ₃	(IDEAM, 2021b)
Barranquilla	3 s	2018-2020	PM _{10'} , PM _{2.5'} , O _{3'} y SO ₂	(EPA Barranquilla verde, 2020)

3.2. Datos meteorológicos

Se utilizó la información meteorológica presentada en las mismas bases de datos para calidad del aire, para parámetros como velocidad y dirección del viento, precipitación, humedad relativa y temperatura promedio. Para Bogotá se utilizaron los datos del informe de caracterización climatológica; para el AMVA del anuario estadístico de la Gobernación de Antioquia; para Cali de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire; y para las demás ciudades de publicaciones del IDEAM.

3.3. Datos sobre salud

Los datos de tasa de mortalidad por infecciones respiratorias agudas (IRA), se obtuvieron del Sistema Integrado de Información de la Protección Social (SISPRO), del subgrupo 108 (SISPRO & Minsalud, 2020) (SISPRO & Minsalud, 2020) . Los datos se presentan como promedios anuales para mujeres y hombres y de ambos. Se usaron datos del 2005 al 2018. Para el año 2019 se hizo el cálculo dividiendo el número de muertes por IRA sobre la población de dicho año. Para Bogotá la información se obtuvo del observatorio de salud de Bogotá (SALUDATA, 2020c), donde

se encontraron tasas de mortalidad por IRA por localidades del 2005 al 2019. Los datos sobre prevalencia de tabaquismo fueron obtenidos para Bogotá de la plataforma SALUDATA; para Bucaramanga del observatorio de salud pública de Santander (OSPS, 2020); de Sogamoso del estudio hecho por (S. Hurtado, 2014); para Cali de (Pardo & Piñeros, 2011); para Santa Martha de (Martínez et al., 2018); para AMVA de (Lemoine et al., 2014) y para Villavicencio de (García-Baquero et al., 2011). Para las comorbilidades, se utilizaron los datos de mortalidad por Diabetes Mellitus y de hipertensión de las páginas de (SALUDATA, 2020c) y (SISPRO & Minsalud, 2020), que incluye la información de mortalidad por grupos y subgrupos por municipio. Los datos sobre cobertura de salud para los años 2019-2020 se sacaron de la página web del Ministerio de Salud (Minsalud, 2020), donde se encuentran discriminados por ciudades. En la página de (SALUDATA, 2020a) se encuentran discriminados por localidades para la ciudad de Bogotá. Los datos sobre casos confirmados por COVID 19 se obtuvieron para Bogotá de la página (SALUDATA, 2020b); y para el resto del país se encuentran en la página web del Instituto Nacional de Salud (GOV.CO, 2021).

3.4. Datos sobre variables socioeconómicas

Se utilizó la variable de ingresos totales corriente per cápita como indicador de la variable ingresos del sistema de estadística territoriales del Departamento Nacional de Planeación para cada una de las ciudades (DNP, 2020). En el caso de Bogotá, se obtuvieron los datos por localidades en el estudio hecho por (Cediel & Velásquez, 2016). Otra variable fue la prevalencia de estrato por cada localidad en el caso de Bogotá, la cual fue consultada en las páginas de cada una de las localidades.

Para datos sobre densidad poblacional, se utilizaron los datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para todos los años y ciudades. Se realizó el cálculo de densidad por km², de acuerdo a lo utilizado en los estudios de (Hendryx &

Luo, 2020; Lolli et al., 2020). Los valores de área por ciudad se obtuvieron de las páginas de cada alcaldía y para las localidades de Bogotá, de la Secretaría de planeación (SDP, 2021). Se utilizó también una variable relativa a la distribución etárea, que fue el porcentaje de personas mayores a 65 años de edad, obtenido de las fichas de caracterización de cada ciudad encontradas en el Sistema Sistema de Estadísticas Territoriales TERRIDATA (DNP, 2020). Para Bogotá los datos por localidades se obtuvieron de SALUDATA (Rodríguez et al., 2020).

3.5. Modelo de regresión lineal multivariado

Se desarrollaron diversos modelos explicativos de las variables dependientes relacionadas con enfermedad, como el IRA y COVID 19, a partir de las variables independientes relacionadas con calidad el aire, tabaquismo, comorbilidades y variables socioeconómicas. El método de ajuste estadístico usado fue los mínimos cuadrados, implementado en el Software Statgraphics Centurión XVI. Se analizó la representatividad del modelo completo por medio del estadístico de Fisher (F), de cada una de las variables independientes y de ajuste del modelo mediante el estadístico R^2 (Sánchez-Colomer, 2010). Para los resultados obtenidos se analizaron el estadístico Durbin Watson y la homocedasticidad de los residuales. Se estableció si el modelo estaba bien especificado, y cuales variables eran significativas utilizando un intervalo de confianza del 95%.

4. Resultados y discusión

Una vez visto el interés académico que existe sobre el tema de calidad del aire y salud y el vínculo existente entre éstos y la pandemia por COVID-19, en esta parte del capítulo vamos a presentar los resultados encontrados sobre

las correlaciones entre calidad del aire ambiente y un conjunto de variables en territorio colombiano, a saber: socioeconómicas, de salud, hábitos y enfermedades respiratorias, meteorológicas y ambientales. Con la metodología empleada se recopilaron y analizaron datos de calidad del aire, así como su correlación con variables de interés desde el punto de vista de salud pública. Se desea brindar al lector la idea de cómo existe afectación a corto y largo plazo en las infecciones respiratorias agudas y por COVID-19 en distintas zonas del país, a causa del aire ambiente que respiramos y de las condiciones de vida que poseen las personas en diferentes lugares del territorio colombiano.

Para empezar, analizaremos los informes de calidad del aire en Colombia obtenidos durante una década, a partir del 2007 hasta el año 2018. En éstos se consignan mediciones de diferentes tipos de contaminantes, sus magnitudes y también la cantidad de estaciones encargadas del monitoreo las cuales, afortunadamente, aumentaron durante este periodo de tiempo. En el informe del año 2007 se reportan datos de calidad del aire para el Área metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y para las ciudades de Barranquilla, Bogotá, Bucaramanga y su área metropolitana, Sogamoso, Villavicencio, Santa Marta, Cali y otras ciudades (Costa et al., 2007). Aquí solo nos enfocaremos en datos de ciudades que mencionaremos explícitamente. En dicho documento se muestra que, afortunadamente, las ciudades de Sogamoso y Cali midieron concentraciones de PM_{10} inferiores al máximo valor permisible de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (anual) mientras que, lastimosamente, las demás ciudades mostraban concentraciones de PM_{10} por encima de este límite (igual para O_3 cuyo límite era de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedios 8h). Para las demás ciudades la magnitud de otros contaminantes monitoreados fue bajos (Costa et al., 2007). En el informe posterior, para el periodo de 2007 al 2010, las ciudades de Bucaramanga y Bogotá detectaron aumentos en los niveles de PM_{10} y NO_2 sin extralimitar los máximos permisibles ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual, respectivamente), mientras que en Santa Marta y el

AMVA se encontró una disminución en las concentraciones de dichos contaminantes. En la ciudad de Sogamoso y en AMVA se detectaron aumentos en las concentraciones de PM_{10} y de O_3 , respectivamente. Para las ciudades de Barranquilla y Cali no hubo datos (Hernández et al., 2012).

A destacar, en el informe presentado para el periodo del 2011 al 2015 el material particulado PM_{10} fue el más monitoreado en todo Colombia, siendo AMVA, Bogotá, Santa Marta, Bucaramanga y su Área Metropolitana las ciudades que mostraron concentraciones para este contaminante mayores a los límites permisibles ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ anual). Se infirió que esto es debido a la elevada densidad poblacional y a la gran cantidad de fuentes fijas. En la ciudad de Cali y Sogamoso se monitoreó un incremento los niveles de PM_{10} pero sin superar los límites permisibles y una disminución en las concentraciones de este, respectivamente. Para Barranquilla y Villavicencio no se registraron datos (IDEAM, 2016).

Para el informe del año 2016 el AMVA y las ciudades de Cali y Bogotá mostraron valores de PM_{10} y $PM_{2.5}$ que superaron los máximos permisibles anuales (para $PM_{2.5}$ de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Respecto al NO_2 se evidenció concentraciones cerca de $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para el SO_2 se midieron concentraciones muy bajas (casi del 25% del valor permisible). Para CO y O_3 los límites permisibles de $8.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedios 8h y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, no se superaron. Para Villavicencio, Sogamoso y el área metropolitana de Bucaramanga, no se encontraron datos (IDEAM, 2017).

Para el año 2017 algunas ciudades contaban con cierto número de estaciones, las cuales se muestran en la Tabla 2. Cerca del 93% de los datos de estas estaciones de monitoreo de contaminantes del país se mantuvieron por debajo de los máximos permisibles anuales para PM_{10} , y solo seis de éstas ubicadas en Bogotá, Santa Marta y otras ciudades excedieron el valor del límite permisible anual de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ese contaminante. El 73% de las estaciones que monitorearon $PM_{2.5}$ cumplieron con el

máximo permisible anual (menor a 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y en dicho informe Bogotá y Medellín fueron ciudades escogidas como caso estudio (Pineda, 2017).

En el año 2018 entró a regir la nueva resolución 2254 del 2017 en la que se actualizaban los límites permisibles para las concentraciones de contaminantes atmosféricos. Para este año, seis de las 73 estaciones del país mostraron concentraciones que sobrepasaron los límites anuales permisibles de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Estas estaciones estaban ubicadas en Bogotá, Barranquilla, y el AMVA, las cuales son regiones que poseen alta densidad poblacional y muchas fuentes móviles. Respecto a las mediciones de $\text{PM}_{2.5}$ se observó que para tres (en Bogotá y AMVA) de las 52 estaciones se sobrepasaron los valores máximos permisibles, mientras que para el NO_2 no se registraron valores exacerbados, pero si las concentraciones más altas de todo el país. Para el contaminante SO_2 se determinó que se excedieron los límites permisibles en Sogamoso y Bogotá. Finalmente, las estaciones de Cali y AMVA detectaron niveles elevados de O_3 en una exposición de 8h (IDEAM, 2019).

Tabla 2. Cantidad de estaciones de monitoreo de algunas ciudades para el 2017

Ciudad	estaciones
	2017
Bucaramanga y AM	9
Valle Aburrá	19
Barranquilla	5
Bogotá	13
Sogamoso	2
Santa Marta	12
Cali	9

3.1. Resultados históricos y 2020 para Bogotá

Para la capital colombiana se analizaron los contaminantes PM_{10} , $PM_{2,5}$, O_3 y NO_2 por medio de datos diarios obtenidos del SISAIRE en once estaciones de monitoreo. Siendo el ozono un oxidante implicado en la irritación de las mucosas y en la inflamación y envejecimiento de tejido respiratorio, es importante constatar cómo ha estado la capital respecto a este contaminante. La Figura 1 muestra la concentración de O_3 (promedios de 8h según la norma) en el periodo de 2010 a 2019 en nueve localidades de Bogotá.

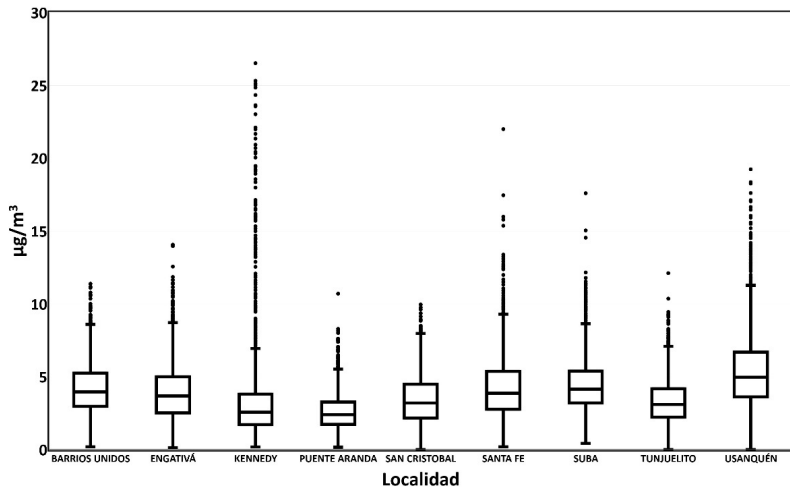


Figura 1. Concentración de Ozono en localidades de Bogotá durante 2010 a 2019

En Bogotá se destaca que la localidad de Kennedy registra las mayores concentraciones llegando a valores elevados de $26,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que son casi la cuarta parte del valor límite permisible. Las localidades de Santa fe, Suba y Usaquén presentaron episodios con datos por encima de los $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el intervalo de años de 2010 a 2019. Las localidades de Puente Aranda y San Cristóbal presentan las concentraciones de O_3 más bajas. En general los promedios de las concentraciones de O_3 en todas las localidades

no superaron los $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los registros de material particulado para en estas mismas estaciones son menos alentadores. Cinco de las 11 estaciones muestran valores de la media multianual para PM_{10} por encima del límite permisible de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Ejemplos de esta situación suceden en las localidades de Puente Aranda y Kennedy. Afortunadamente, para los ciudadanos que viven o transitan en las localidades de Barrios Unidos y San Cristóbal, las concentraciones de dicho material particulado están por debajo del máximo permisible. Sin embargo, para San Cristóbal se presentaron episodios con magnitud de $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual es alarmante, pues cae dentro de la categoría de prevención de la resolución 2254 de 2017. En la Figura 2 se observa que para $\text{PM}_{2.5}$ las localidades de Kennedy y Chapinero (con datos de monitoreo de 2019 tomados por la estación Movil_7ma) son las que presentan mayores valores para este contaminante (media multianual), seguido por las localidades de Tunjuelito, Suba y Puente Aranda. Es importante mencionar que el $\text{PM}_{2.5}$ se monitoreó en las estaciones después del año 2014. Además, aunque las otras localidades no muestran valores multianuales superiores a la media diaria máxima permisible, si hay eventos donde este contaminante ha presentado niveles peligrosos para la salud humana. Con todo lo anterior se puede decir que en general en toda la ciudad las concentraciones diarias de $\text{PM}_{2.5}$ no superan los valores máximos permisibles, aunque del cuartil 3 en adelante se presentan valores atípicos que superan la media diaria máxima permisible.

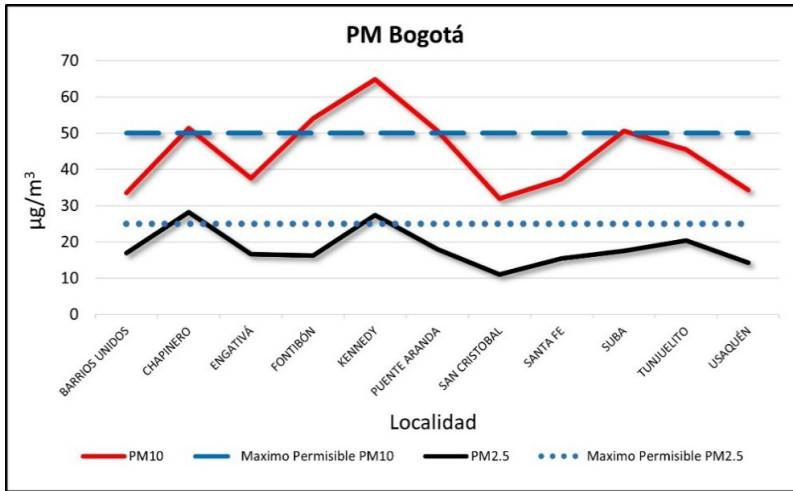


Figura 2. Media multianual de material particulado para Bogotá durante 2007 a 2018

El gas NO_2 fue monitoreado durante nueve años comprendidos entre el 2010 y el 2019 en las estaciones Centro de Alto Rendimiento de la localidad de Barrios Unidos, Kennedy de la localidad de igual nombre, Las Ferias de la localidad de Engativá, Puente Aranda, el Tunal para la localidad Tunjuelito y Suba con la estación Guaymaral. Los datos registrados para este contaminante no superan la media anual máxima permisible de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$, pero si presentan eventos superiores a este límite implicando que estos días fueron peligrosos para grupos sensibles a contaminación del aire ambiente.

Para el año 2020, cuando iniciaba la pandemia a nivel mundial, los datos de calidad del aire de Bogotá se analizaron en tres periodos comprendidos entre el 1 de enero al 1 de marzo del mismo año, del 2 de marzo al 1 de mayo y por último del 2 de mayo al 30 de junio. Según el artículo 20, capítulo 4 de la resolución 2254 de 2017, el índice de calidad del aire (ICA) posee puntos de corte, los cuales se emplean para este estudio. Se calculó el ICA para los datos de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, debido a que son los contaminantes

para los cuales existe información diaria para este semestre del año. El primer intervalo de tiempo coincide con el hecho de que no se estableció cuarentena obligatoria en la capital, por lo que la actividad económica fluía cotidianamente. En este periodo el ICA, donde se distinguen los colores verde para calidad buena, amarillo para aceptable, anaranjado para dañina a la salud de grupos sensibles, rojo para dañina para la salud, violeta para muy dañina y marrón para peligroso, estuvo dominado por un color verde para PM_{10} en casi todas las estaciones.

Una rápida inspección de la Figura 3 permite constatar lo anterior, y además permite analizar que también se evidenciaron días con una calidad del aire ambiente aceptable (color amarillo) para las estaciones de Chapinero, Puente Aranda y Tunjuelito. Por otra parte, en la Figura 4 se muestra el ICA para $PM_{2.5}$, donde se observa que prevalece el color amarillo en todas las estaciones (calidad de aire aceptable) a excepción de los datos de la estación de puente Aranda. Sin embargo, lo más alarmante en este semestre respecto al ICA, fue que los datos monitoreados en algunas estaciones presentaron una calidad de aire considerada como dañina para la salud de grupos sensibles como niños y adultos de la tercera edad. Los días donde esto ocurrió fueron el 4, 21, 28 y 29 del mes de enero, y 7, 8, 21, 22, 25-29 de febrero para Chapinero, y los días 9, 22 y 28 de enero y 3-10, 12-14, 21, 25, y 27-27 de febrero, en la estación de Kennedy.

Durante el segundo intervalo de tiempo, que incluye el inicio de la cuarentena obligatoria en Colombia a partir del 25 de marzo, se observa que el ICA para $PM_{2.5}$ es casi siempre de color anaranjado. Los días para estos eventos en las estaciones se muestran en la Tabla 3.

De la Figura 4 se observa que el ICA para $PM_{2.5}$ estuvo en color rojo para las estaciones Tunjuelito, Suba, Puente Aranda, Engativá, Fontibón, Chapinero y Kennedy coincidiendo en los días del 18 al 19 para todas las anteriores y el 6 de marzo para las dos últimas,

siendo Chapinero y Kennedy las de mayor afectación. De seguro, esta calidad del aire dañina tuvo efectos adversos para la salud de los capitalinos. En el mes de abril se monitoreo una mejor calidad del aire ambiente, observando para PM_{10} y $PM_{2.5}$ colores verde y amarillo.

Tabla 3. Días con ICA dañino en Bogotá desde 2 de marzo al 1 de mayo

Estación	Días
Barrios Unidos	6, 7, 18-20, 23, 24, 29, 30
Chapinero	3-5, 7-13, 16,17, 21, 23,24, 27-30
Engativá	6,7, 17,18, 20, 23,24, 29,30
Fontibón	3, 5-7, 17, 20, 22, 23, 27-30
Guaymaral-Suba	6, 7, 18,19, 23,24, 29, 30
Kennedy	2-5, 8-10, 12,13, 16,17, 20, 23, 24, 26-30
San Cristóbal	6, 18-20, 29
Santa fe	días 6,7 17-20, 29
Tunjuelito	6,7, 16,17, 19, 20, 29, 30
Usaquén	6, 7, 18, 19, 23,24, 28-30



Figura 3. Índice de calidad del aire para PM_{10} en el primer semestre del 2020 en Bogotá

El tercer periodo coincide con la retoma gradual de actividades económicas, lo que repercutió en el incremento de los niveles de $PM_{2.5}$. Así, se observan más días con ICA en color amarillo, algunos otros en color anaranjado y días en color rojo para la localidad de Kennedy. Esto implica que la calidad del aire atmosférica está relacionada estrechamente con las actividades económicas de la capital colombiana.

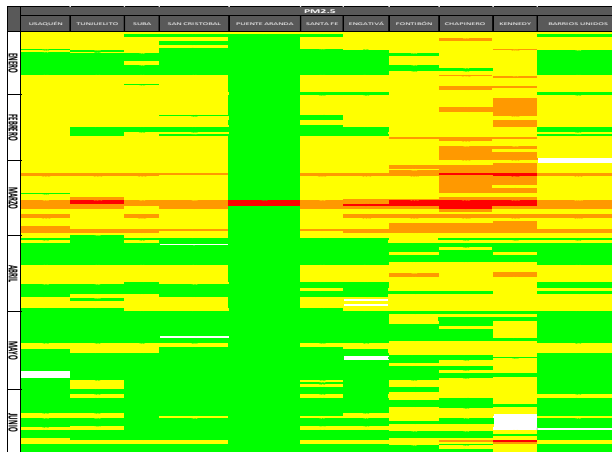


Figura 4: Índice de calidad del aire para $PM_{2.5}$ en el primer semestre del 2020 en Bogotá

3.2. Resultados históricos y 2020 para Colombia

Para el territorio nacional se investigaron los datos de calidad del aire medidos en las ciudades de Barbosa (de Antioquia), Barranquilla, Bello, Bogotá, Bucaramanga, Caldas, Cali, Floridablanca, Girardota, Girón, Itagüí, Medellín, Santa Marta, Sogamoso y Villavicencio. Se presentan los resultados de promedios diarios para PM_{10} y $PM_{2.5}$ obtenidos del SISAIRE para cada una de las ciudades mencionadas arriba, las cuales se seleccionaron como caso-estudio por cubrir regiones diferentes del territorio nacional. Para las ciudades de Medellín, Caldas, Girardota, Itagüí, Barbosa y Bello se obtuvieron los valores de la base de datos del SIATA. La Figura 5 muestra la variación multianual para el material particulado en las 15 ciudades

colombianas de este estudio. En dicha figura se observa que Barranquilla y Bello poseen valores comparables a la media anual máxima permisible ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} , mientras que las demás ciudades están por debajo de este parámetro. El análisis de datos diarios (no mostrados aquí) indica que todas las ciudades (menos Bucaramanga) presentan valores elevados que superan los $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que son la media diaria máxima de concentración de la resolución del año 2017.

Se puede verificar en la Figura que las concentraciones de PM_{10} para las ciudades colombianas Barranquilla, Bello, Itagüí y Medellín son las que poseen mayor magnitud del promedio multianual, llegando a niveles peligrosos para toda la población. Las ciudades de Santa Marta y Villavicencio muestran las concentraciones más bajas durante el periodo de 2010 a 2019. Respecto a los resultados de $\text{PM}_{2.5}$, se observa claramente que los valores de la media multianual de casi todas las ciudades no superan el máximo permisible, siendo Barranquilla la única ciudad en que sucede esto. Medellín y Caldas Antioquia son las que presentan las magnitudes más cercanas a la norma y Barbosa la de menor magnitud. Del análisis de datos se observa que todas las ciudades presentan una frecuencia alta de datos superiores a la media anual permisible de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

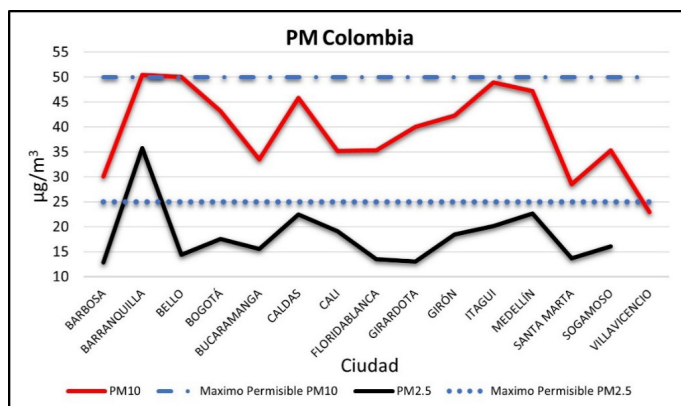


Figura 5. Concentración multianual de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ para las ciudades caso-estudio.

Para ozono, los datos registrados muestran que ninguna de las ciudades excede los niveles máximos permisibles de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para promedios de 8h. Además de los anterior, se analizaron datos diarios para PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO , O_3 , NO_2 , y SO_2 para las distintas zonas del país tomadas para el estudio. Como se mencionó antes para el ICA en Bogotá, solo se calculó éste para los datos de material particulado para el primer semestre del año comprendido entre el 1 de enero de al 30 de junio de 2020. De esta forma, para AMVA la cual está compuesta con datos de los municipios de Medellín, Itagüí, Caldas, Girardota, Bello y Barbosa pertenecientes al departamento de Antioquia se calculó el ICA. En el AMVA sucede el mismo comportamiento que en la ciudad de Bogotá, donde se observa que en marzo existe una situación de calidad atmosférica dañina para la salud, con los agravantes de que, en Caldas, se observó un día con ICA de color violeta el día 31 de marzo por causa de $\text{PM}_{2.5}$ y el día 21 de mayo un color marrón. También en Medellín y Bello se observaron días con ICA en color Rojo en fechas del 6, 7, 9, 12, 13, 17-19, 24-26, 29 y 30 de marzo y el 8 y 11 de abril, respectivamente.

Para Bucaramanga y su AM el comportamiento fue similar al mostrado en el AMVA y la ciudad de Bogotá. Así, en marzo se presentan los valores de ICA más altos con días en color rojo, considerándose situaciones dañinas para la salud de la población. En Bucaramanga, Floridablanca y Girón se observaron para $\text{PM}_{2.5}$ valores del ICA en rojo los días 7, 17-19, 22 al 26, para el primero, los días 7, 10, 12, 17-31 para el segundo y los días 7, 17-20, 22-25 y 27 de marzo, para el tercero. Estos niveles elevados de contaminación se asocian con quemas de residuos sólidos transportados hasta el área metropolitana de Bucaramanga (AMB, 2020) desde la frontera Venezolana. Cuando hubo reapertura económica, en Girón y Bucaramanga (AMB, 2020) se observaron días con un ICA aceptable para finales del mes de junio.

En Barranquilla los datos de calidad del aire (de las estaciones de monitoreo tres aves maría, policía y móvil) muestran un comportamiento opuesto al de las anteriores ciudades, y es que en marzo el ICA mejoró pasando a verde (bueno) para PM_{10} y $PM_{2.5}$. Esto puede asociarse a las restricciones a la movilidad de vehículos de transporte de carga pesada del puerto. Santa Marta, que también cuenta con un puerto marítimo, evidenció un ICA verde para PM_{10} durante enero y amarillo para $PM_{2.5}$ después del mes de febrero. Como no se recopilaban más datos en la estación de monitoreo no fue posible inferir como fue la variación en la calidad del aire ambiente desde finales de marzo a junio.

Para la ciudad de Sogamoso se observa que la estación *el recreo* presenta valores elevados de ICA en color anaranjado (PM_{10}) los días 6, 28 y 29 del mes de marzo. Durante la reapertura económica se observaron días en que el ICA se presentaba en color amarillo, indicando que la cuarentena influyó en la mejora de la calidad del aire de esta ciudad. En Villavicencio solo se monitoreó PM_{10} y O_3 . Para estos contaminantes se observó en casi todo el periodo un ICA verde (bueno) y solo cambió a amarillo en los días 31 de enero, 4, 5, 11, 12, 18, 21, 25 y 27 de febrero, 11, 12, del 17-20 de marzo, 15-18 de abril, el 6 de mayo y el 23 de junio. En la ciudad de Cali, se observó un ICA verde con mayor frecuencia, y solo fue amarillo para $PM_{2.5}$ durante los meses de enero a junio, y para PM_{10} en algunos días. De los resultados nacionales de PM para el ICA, se encontró que es frecuente un ICA verde para PM_{10} y solo se monitorearon dos picos con ICA rojo. Para $PM_{2.5}$ se presentó un pico en color marrón ya mencionado antes, tres en violeta, varios en color rojo, pocos picos en verde, pero casi siempre un ICA amarillo para este contaminante criterio. Se logra inferir que en general el ICA mejoró con la cuarentena en todo el territorio nacional representado con estas ciudades caso estudio.

Respecto a los valores promedio para PM_{10} y $PM_{2.5}$ se observa en la Figura 6 que las ciudades de Barranquilla y Floridablanca son las de mayores concentraciones de PM_{10} en todo el país,

llegando a superar la media anual máxima permisible para este contaminante (línea roja discontinua). Por otro lado, la ciudad de Santa Marta muestra las menores concentraciones de PM_{10} durante el primer semestre del 2020 (barras negras).

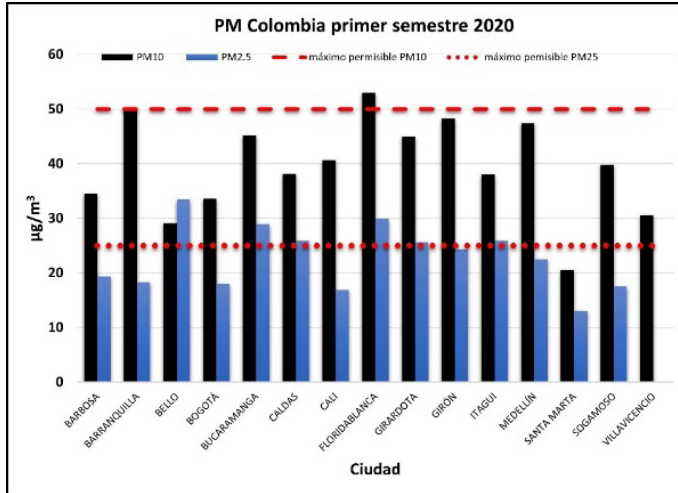


Figura 6. Concentración multianual de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para el primer semestre del año 2020

Respecto a $PM_{2.5}$ en la Figura 6 (barras azules) se observan diversos comportamientos, destacando que las ciudades de Bello, Bucaramanga, Caldas, Floridablanca, Girardota e Itagüí son las que presentan mayor concentración de este contaminante criterio sobrepasando los límites permisibles, mientras que Santa Marta muestra las menores concentraciones. Se puede decir que Bucaramanga y su área metropolitana y el AMVA poseen condiciones adversas para la salud de sus habitantes en lo que se refiere a concentración de $PM_{2.5}$ si se comparan con las demás ciudades de este estudio.

3.3. Modelos multivariados explicativos

En esta parte se mostrarán los resultados de los modelos estadísticos multivariados con el fin de analizar las correlaciones usando los datos de calidad del aire mencionados antes para Bogotá y las 15 ciudades que representan el territorio colombiano. Para algunos contaminantes criterio, especialmente material particulado, puede existir influencia directa o indirecta debida a condiciones ambientales o socioeconómicas. Con esto en mente, para los modelos se incluyeron datos meteorológicos, ingresos per cápita, tabaquismo, tasas de mortalidad por diabetes e hipertensión, aseguramiento en salud, densidad poblacional, y porcentaje de personas menores a 64 años y mayores a 65 años. Siguiendo la metodología propuesta se buscó determinar la afectación a largo plazo para determinar si hubo influencia en los casos de mortalidad y morbilidad por IRA y COVID-19 durante el primer semestre del año 2020. Los datos del primer semestre del año 2020 sirvieron para determinar si todas estas variables influyen a corto plazo en la salud de la población de las ciudades de este estudio. Es pertinente mencionar que todos los datos se normalizaron para eliminar la influencia por la magnitud de alguno de estos, evitando así diferencias entre escalas.

La Tabla 4 muestra las variables empeladas en esta parte del capítulo y se usarán sus abreviaturas a lo largo de lo que resta del texto. Estas variables incluyen información ambiental, meteorológica, de salud y finalmente socioeconómica.

Los modelos multivariados construidos para la ciudad de Bogotá en las series de tiempo de los años 2010 a 2019 y para el 2020 se muestran en la Tabla 5. Estos modelos incluyen un total de 21 variables explicativas para las 11 localidades, con grados de libertad respectivos y con residuales cumpliendo la prueba de homocedasticidad. En la columna tres de la tabla se observan el coeficiente de correlación (R^2) y el parámetro de Fisher (F, que representa un intervalo de confianza para el cociente de las varianzas) ambos indicando la buena calidad de un moldeo

estadístico si el primero es cercano a la unidad y el segundo tiene valores muy por encima de ésta (Harris, 2001; Norman & Harry, 1998). También se incluye el estadístico de Durbin-Watson (DW), para comprobar la no existencia de correlaciones entre el orden de las variables o los residuales, siempre y cuando su magnitud tenga un valor mayor a 0,05.

Tabla 4. Variables usadas en los modelos de regresión multivariada.

ABREVIATURA	VARIABLES Y UNIDADES
DEPENDIENTES	
IRA	Tasa Mortalidad por Infecciones Respiratorias Agudas
CON	Casos confirmados por Covid19
FAL	Fallecidos por Covid19
LET	Letalidad Covid19
EXPLICATIVAS	
PM10	Material particulado de 10 micras $\mu\text{g}/\text{m}^3$
CO	Monóxido de carbono $\mu\text{g}/\text{m}^3$
O3	Ozono $\mu\text{g}/\text{m}^3$
NO2	Dióxido de nitrógeno $\mu\text{g}/\text{m}^3$
SO2	Dióxido de azufre $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM25	Material particulado de 2.5 micras $\mu\text{g}/\text{m}^3$
P	Precipitaciones mm
Vv	Velocidad del viento m/s
T°	Temperatura °C
Hr	Humedad relativa %
Ct	Prevalencia por consumo de tabaco en %
Md	Tasa de mortalidad por diabetes fallecidos/población por cada 100000 habitantes
Mh	Tasa de mortalidad por hipertensión fallecidos/ Población por cada 100000 habitantes
Cs	Porcentaje de cobertura de salud
Ipc	Ingresos per cápita
Es	Estrato socio económico
Pp	Población proyectada para el año 2020

Dp	Densidad poblacional
E	Porcentaje de personas menores a 64 años
Nct	Porcentaje de personas no consumidoras de tabaco

Para IRA (entrada 1 de la Tabla 5) las variables explicativas fueron Ct, Em, T°, Pp y PM25. Importante destacar que el material particulado de 2.5 micrómetros es causante del 3% de muertes por infecciones respiratorias agudas en el país (diagnóstico ambiental del año 2012), y que el consumo de tabaco ha incrementado el número de fallecimientos por contaminación en interiores además de afectar el sistema respiratorio (M. Hurtado et al., 2012). El modelo encontrado se confirma por la información recogida en el Boletín epidemiológico distrital para 2019, donde se indica que el material particulado de exteriores causa diferentes enfermedades respiratorias (Porrás et al., 2019).

Tabla 5. modelos estadísticos multivariados de este estudio

N°	Modelo Multivariado	Estadísticos R ² ; F; DW
Bogotá		
1	IRA = 72,70 + 0,75(Ct) - 0,62(Em) - 0,54(T°) - 0,18*(Pp) + 0,005(PM10)	0,98; 72; 0,41
2	FAL = -175,5 + 1,91(Ct) - 0,51(Md) + 0,66(Pp) + 0,74(Dp) + 0,69(Vv) - 0,14(T°) - 0,24(Hr) + 0,20(PM25) + 0,15(PM10)	0,99; 622; 1,8
3	FAL ²⁰²⁰ = -189,68 - 0,21(Md) + 0,52(Pp) - 0,77(Es) + 0,74(Em) - 0,22(lpc) + 0,93(P) - 0,12(Hr) + 0,31(O3) + 1,87(PM10)	0,99; 880; 2,7
4	CON ²⁰²⁰ = 172,9 + 1,05(Ct) 0,73(Md) + 0,23(Pp) - 0,50(T°) + 0,63(O3) + 2,12(PM10)	0,98; 30; 1,9
Colombia		
5	IRA = 4,61 + 0,68(Md) + 0,09(Mh) + 0,24(Nct) - 0,24(Dp) - 0,59(Em) + 0,47(lpc) - 0,76(T°) + 0,69(P) + 0,47(O3) + 0,32(PM2.5)	0,99; 128; 1,3
6	CON = -86,80 + 0,94(Pp) + 0,36(Vv) + 0,88(Hr)	0,99; 59; 2,9

$$\begin{aligned}
 7 \quad \text{CON}^{2020} &= -99,46 + 0,12(\text{Ct}) + 0,72(\text{Pp}) - 0,28(\text{Es}) + 1,01(\text{Hr}) + 0,97; 34; 2,6 \\
 &0,40(\text{Vv}) - 0,02(\text{O3}) \\
 &\quad + 0,21(\text{PM10}) \\
 8 \quad \text{LET}^{2020} &= -397,71 + 2,51(\text{Nct}) + 0,91(\text{Md}) + 1,06(\text{Pp}) + 1,48(\text{Hr}) \quad 0,90; 12; 2,2 \\
 &+ 0,50(\text{Vv}) + 0,11(\text{O3})
 \end{aligned}$$

Por otro lado, el modelo de fallecidos (FAL en la Fila de número 2 de la Tabla 5) contiene las variables explicativas de PM10 y PM25 así como a Ct, Md, Pp, Dp, Vv, T° y Hr, pertenecientes a los cuatro grupos de variables. Como en el trabajo de Magazzino, también se encontró que el PM está relacionado con fallecimientos por COVID-19 (Magazzino et al., 2020). Es interesante encontrar que las mismas variables que se utilizaron en el estudio de (Wu et al., 2020) fueron seleccionadas por el modelo. Como otro hallazgo importante se evidenció que la diabetes está vinculada con la contaminación en exteriores, en línea con lo mencionado por la secretaria de salud de Bogotá (Porrás et al., 2019), confirmando los resultados del modelo para la capital. En la entrada 3 de la Tabla 5 se muestra la ecuación de FAL²⁰²⁰ que relaciona los casos fallecidos por COVID-19 en Bogotá durante el año 2020. El modelo incluye cuatro variables socioeconómicas, dos meteorológicas, dos ambientales y una variable de salud. Se resalta que la ecuación incluye comorbilidades como la tasa de mortalidad por diabetes (Zhu et al., 2020) variables económicas similares a las de la investigación de (Yao et al., 2020) variables meteorológicas de (Coccia, 2020) y que el modelo selecciona variables del estudio de (Zheng et al., 2020). En líneas generales el modelo muestra la influencia de los contaminantes O₃ y PM₁₀ en la salud de pacientes que pueden fallecer por COVID-19, a causa de la contaminación que puede agravar sus estados de salud (Hendryx & Luo, 2020).

En Bogotá durante el 2020, la variable dependiente CON²⁰²⁰ es explicada por seis variables distribuidas de la siguiente forma: dos comorbilidades, una de población, una meteorológica y dos ambientales (entrada 4 de la tabla). Los contaminantes vinculados

con casos confirmados y muertes por COVID-19 son el O_3 y PM_{10} , estando en la línea de los hallazgos de la investigación de (Setti et al., 2020) e implicando que es de suma importancia su control y monitoreo. Sin embargo siendo cautelosos como sugieren (Zheng et al., 2020) estos hallazgos requieren la inclusión de más variables y datos en la serie de tiempo con el objetivo de poder extraer el vínculo entre las afectaciones de la pandemia y las variables empeladas como explicativas.

En la misma tabla se muestran los modelos obtenidos para las ciudades seleccionadas como representantes del territorio nacional. Estos modelos incluyen promedios multianuales de distintos contaminantes e información de las variables meteorológicas, de salud y socioeconómicas. Los modelos contienen un total de 21 variables y datos de cada una de las 15 ciudades, residuales superando la prueba de homocedasticidad, con estadísticos de F, DW y R^2 y los respectivos grados de libertad de cada modelo. El primer modelo multivariado para el territorio colombiano es el de IRA de los años 2010 a 2019. La ecuación hallada para las 15 ciudades de Colombia está constituida por dos ternas de variables de salud y socioeconómicas, y dos duplas de variables meteorológicas y ambientales. La ecuación se muestra en la entrada 5 de la Tabla 5. Se puede inferir del modelo que el ozono y el PM están vinculados de manera contributiva (coeficientes positivos) con las causas de las enfermedades respiratorias. Interesante ver que la temperatura esta correlacionada negativamente implicando que a mayor temperatura disminuyen las afectaciones, algo natural si se piensa que en las épocas cálidas disminuyen los casos de enfermedades respiratorias. El análisis de este modelo implica que IRA no solo depende de la exposición a contaminantes del aire sino que además influyen otros factores meteorológicos y de edad como lo sugiere (Herrera, 2017).

Respecto al modelo de casos confirmados por COVID-19 (variable CON en entrada 6 en la Tabla 5), se advierte rápidamente que

solo las variables meteorológicas muestran correlación. Esto implica que no fue posible establecer un vínculo tanto con concentraciones de contaminantes del aire ambiente como con otras variables sociales, económicas o de salud. Quizá la razón se deba a que los datos tomados son promedios multianuales no permitiendo ver la variabilidad, por lo que se sugiere una recolección de datos cercanos en tiempo y del resto del año 2020. Esto aumentará los grados de libertad con el fin de poder incluir más variables según lo sugiere el estudio de (Wu et al., 2020).

La entrada 7 de la Tabla 5 muestra el modelo para Colombia durante el año 2020. El modelo incluye una variable de salud, dos socioeconómicas, dos meteorológicas y dos ambientales, explicando que los casos confirmados están influidos por el consumo de tabaco, la población proyectada, el estrato socioeconómico, la humedad relativa, la velocidad del viento, el ozono y material particulado. Este modelo muestra resultados similares a los de la investigación de (Wu et al., 2020; Zheng et al., 2020). El coeficiente de la variable explicativa Ct muestra aporte positivo a la variable CON^{2020} , mientras que O_3 presenta un aporte negativo, aunque de pequeña magnitud. El estrato (Es) también aporta negativamente indicando que a mayores recursos económicos menos afectación por COVID-19. El PM sigue siendo un claro actor en lo que se refiere a afectaciones en la salud respiratoria de la población. La variable Pp claramente implica que a mayor cantidad de personas susceptibles más posibilidad de enfermarse.

La última entrada de la Tabla 5 muestra el modelo para la relación entre letalidad en el año 2020 (LET^{2020}), dos variables de salud (personas no consumidoras de tabaco y la tasa de mortalidad por diabetes); una variable socioeconómica (población proyectada para el año 2020), dos meteorológicas (humedad relativa y velocidad del viento) y finalmente, la variable de un contaminante (ozono). Interesante constatar que dichas

variables se encuentran relacionadas con la razón de letalidad por COVID-19 y que son semejantes a las de los estudios de (Wu et al., 2020; Zheng et al., 2020; Zhu et al., 2020). De la ecuación del modelo se observan únicamente coeficientes positivos, lo que da a pensar sobre los no fumadores y su relación con altos casos de fallecimiento. Dejando a un lado esta interpretación problemática, el resto de las variables permiten inferir que la letalidad depende de muchos factores, entre los cuales destacan las enfermedades preexistentes cuantificadas en este caso por la variable explicativa M_d y el contaminante Ozono.

Para finalizar queremos resaltar que en todos los modelos fueron seleccionados estadísticamente a algún contaminante criterio, lo que permite inferir cual es la importancia que tiene el monitoreo constante de los contaminantes del aire ambiente, ya que estos están vinculados con diversas enfermedades respiratorias (y hoy en pandemia con afectaciones por COVID-19) que padece o pueden llegar a padecer la población colombiana. Pero también, queremos resaltar que mediante los distintos modelos multivariados que mostramos renglones arriba queremos poner a disposición de los lectores algunas ideas que permitan ver lo complejo de los factores que influyen en las enfermedades respiratorias (y de COVID-19), dando claridad en que éstas no solo dependen de un único parámetro, como por ejemplo un contaminante atmosférico, sino que por el contrario debemos atender varios frentes si lo que buscamos es una mejor calidad de vida de nosotros como ciudadanos (de las presentes y futuras generaciones) que permita a todos los niveles la disminución en las tasas de mortalidad y morbilidad por diversas enfermedades respiratorias, más aun cuando estamos en medio de una pandemia.

5. Conclusiones

El incremento del número de estaciones de monitoreo de contaminantes ha permitido un mejor conocimiento del estado del aire ambiente que se respira en diferentes ciudades, y ha influido positivamente en la toma de decisiones desde bases científicas. En este capítulo de libro se mostraron los resultados de datos obtenidos desde diferentes redes de monitoreo, lo cual permitió desarrollar un análisis de la calidad del aire en Colombia y Bogotá para la serie de tiempo de 2010 a 2020.

Se investigó la calidad del aire en 15 ciudades colombianas y 11 localidades capitalinas, buscando correlaciones entre variables explicativas ambientales, meteorológicas, de salud y socioeconómicas y enfermedades respiratorias incluyendo datos de COVID-19 para el año 2020 (Tasa Mortalidad, Casos confirmados, Fallecidos, Letalidad).

Respecto a Bogotá, se determinó que las localidades de Usaquén, Chapinero y Kennedy muestran las mayores concentraciones de contaminantes a lo largo de la serie de tiempo, sugiriendo la necesidad de un mejor el control gubernamental de las emisiones de contaminantes en estas regiones y acciones personales como el uso de mascarilla naso-bucal para mitigar la exposición a los contaminantes atmosféricos. En el territorio nacional, representado por las 15 ciudades elegidas como caso-estudio, se encontraron zonas de contaminación exacerbada por contaminantes PM_{10} y $PM_{2.5}$, siendo el área metropolitana del Valle de Aburrá, la ciudad de Sogamoso, Bucaramanga y su área metropolitana, y Barranquilla las más perjudicadas. Además, se encontró que el municipio de Caldas es una zona donde se presentó un ICA peligroso para la salud.

Los modelos realizados para las variables dependientes IRA, lateralidad, confirmados y fallecimientos por COVID-19

tanto para Bogotá como para el país (representado por 15 ciudades), son explicados estadísticamente por variables que incluyen comorbilidades, condiciones meteorológicas como la temperatura, contaminantes atmosféricos como ozono y material particulado y la exposición prolongada a estos, variables de salud (ej. tabaquismo) así como por la situación socioeconómica (regiones con porcentajes altos de personas mayores a 65 años de edad, la densidad poblacional, población proyectada, etc). En cierta extensión se determinó que la exposición a O_3 y PM_{10} a corto plazo están vinculados con la morbilidad y mortalidad causadas por COVID-19, junto a una relación con las condiciones socioeconómicas y de salud de la población. Se sugirió la necesidad de más estudios y el uso de más datos para más ciudades con el fin de extraer los vínculos de las variables explicativas con las enfermedades respiratorias y los casos confirmados por COVID-19.

6. Referencias

- Acevedo Suarez, L., (2021). *Influencia de la calidad del aire en la mortalidad y la morbilidad por enfermedades respiratorias en Colombia*. Trabajo de grado de grado, Universidad Santo Tomas, Tunja.
- Aguiar Gil, D. (2020). *Evaluación del impacto de la contaminación atmosférica por pm2.5 sobre la mortalidad de la población en el Valle de Aburrá, Antioquia, Colombia*. <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/14391>
- AMB. (2019). Calidad del Aire. In *Calidad del aire*. <https://www.amb.gov.co/calidad-del-aire/>
- AMB. (2020, April 4). *Informe ejecutivo episodio de contaminación de aire en el área metropolitana de Bucaramanga*. <https://www.amb.gov.co/torre-de-control-calidad-del-aire/>

- Andrea Rodríguez Villamizar, L., Castro Ortiz, H., José Rey Serrano, J., Berena Herrera López, A., & Niederbacher Velázquez, J. (2010). *Contaminación atmosférica y sus efectos en la salud en Bucaramanga*.
- Ángel Macías, M. A., & Gallini, S. (2019). Cooperación técnico-científica internacional en la construcción de redes de monitoreo atmosférico. El caso de Bogotá (1960-2016)/ International Technical-Scientific Cooperation in the Construction of Atmospheric Monitoring Networks. The Case of Bogotá. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 25, 143–167. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.25.2019.3619>
- Cediel, D., & Velásquez, C. (2016). *La prosperidad en Bogotá y su área metropolitana*. http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/1._estudio_indice_prosperidad.pdf
- Clean air institute, & Área metropolitana valle de Aburrá. (2017). *ESTRATEGIAS AMBIENTALES INTEGRADAS Entregable 7 Documento final del PIGECA*.
- Coccia, M. (2020). Two mechanisms for accelerated diffusion of COVID-19 outbreaks in regions with high intensity of population and polluting industrialization: the air pollution-to-human and human-to-human transmission dynamics. *MedRxiv*, 2020.04.06.20055657. <https://doi.org/10.1101/2020.04.06.20055657>
- Comunian, S., Dongo, D., Milani, C., & Palestini, P. (2020). Air Pollution and COVID-19: The Role of Particulate Matter in the Spread and Increase of COVID-19's Morbidity and Mortality. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(12), 4487. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124487>
- CORPOBOYACÁ. (2020). *Trámites y servicios – Corpoboyacá*. <https://www.corpoboyaca.gov.co/tramites-y-servicios/>
- Costa, C., Saldarriaga, G. de J., Lozano, R., & Suarez, R. (2007). *Informe Anual sobre el Estado del Medio Ambiente y los*

- Recursos Naturales Renovables en Colombia: Calidad del Aire*. IDEAM. http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/6.+IAEARNR_Calidad+del+aire.pdf/6f0e1abbd202-48f1-a836-891d70acc408?version=1.0
- DNP. (2020). *TerriData* . <https://terridata.dnp.gov.co/index-app.html#/perfiles>
- Duan, R.-R., Hao, K., & Yang, T. (2020). Air pollution and chronic obstructive pulmonary disease. *Chronic Diseases and Translational Medicine*. <https://doi.org/10.1016/j.cdtm.2020.05.004>
- EPA Barranquilla verde. (2020). *Trámites y Servicios Barranquilla Verde - Establecimiento Público Ambiental*. <http://barranquillaverde.gov.co/tramites-y-servicios>
- Félix-Arellano, E., Schilman, A., Magali, H.-D., Texcalac Sangrador, J. L., & Riojas-Rodríguez, H. (2020). Revisión rápida: contaminación del aire y morbilidad por Covid-19. *Salud Pública de México*, 62. <https://doi.org/10.21149/11481>
- García-Baquero, M., Tobon-Borrero, L., & Ramirez-Duarte, M. (2011). Consumo de sustancias psicoactivas en estudiantes Universitarios en Villavicencio 2009-2010. *Revista CUIDARTE*, 2. <https://doi.org/10.15649/cuidarte.v2i1.52>
- García, D., Ortíz, C., & Escobar, J. (1996). *Contaminación atmosférica y salud: estimación de una función dosis-respuesta para Título Cali...: 1*. <http://bibliotecavirtual.clacso.org.ar/Colombia/cidse-univalle/20121115015022/doc27.pdf>
- GOV.CO. (2021). *Casos positivos de COVID-19 en Colombia | Datos Abiertos Colombia*. <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/Casos-positivos-de-COVID-19-en-Colombia/gt2j-8ykr/data>
- GRAHAM, N. M. H. (1990). THE EPIDEMIOLOGY OF ACUTE RESPIRATORY INFECTIONS IN CHILDREN AND ADULTS:

- A GLOBAL PERSPECTIVE. *Epidemiologic Reviews*, 12(1), 149–178. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.epirev.a036050>
- Han, L., Zhou, W., Pickett, S. T. A., Lia, W., & Qiana, Y. (2018). Multicontaminant air pollution in Chinese cities. *Contaminación Del Aire Con Múltiples Contaminantes En Las Ciudades Chinas.*, 96(4), 233-242E. <https://doi.org/10.2471/BLT.17.195560>
- Harris, R. J. (2001). *A Primer of Multivariate Statistics*. Lawrence Erlbaum Associates. <https://books.google.ps/books?id=u20uvgAACAAJ>
- Hendryx, M., & Luo, J. (2020). COVID-19 prevalence and fatality rates in association with air pollution emission concentrations and emission sources. *Environmental Pollution*, 265, 115126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115126>
- Hernández, A., Bohorquez, A., Pinzón, F., Guzman, L., & Moreno, Y. (2012). *Informe de estado de la calidad del aire en Colombia 2007-2010*. IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documentos/51310/68521396/5.+Informe+del+estado+de+la+calidad+del+aire+2007-2010.pdf/52d841b0-afd0-4b8e-83e5-444c3d17ed29?version=1.0>
- Herrera F, M, A., E, G., & D, T. (2018). *ODS en Colombia: Los retos para 2030 | El PNUD en Colombia*. <https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/library/ods/ods-en-colombia--los-retos-para-2030.html>
- Herrera, S. (2017). Valor económico de la calidad del aire en la localidad de Kennedy medido desde la salud de los habitantes. *instname:Universidad de los Andes*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/15240>
- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Abdul Halim, S., Achlatis Australia, M., Alexander, L. V, Allen, M. R., Berry, P., Boyer, C., Brilli, L., Buckeridge, M., Byers Austria, E., Antonio Marengo Brazil, J., Pereira, J., Sherstyukov, B., Jacob,

- D., Taylor, M., Bindi, M., ... Waterfield, T. (2018). *Impacts of 1.5°C of Global Warming on Natural and Human Systems*.
- Hurtado, M., Blanco, L., Acuña, J., Jaimes, D., Duarte, H., Moreno, J., Fernández, J., & Pinzón, C. (2012). *Diagnostico nacional de salud ambiental*. [https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico de salud Ambiental compilado.pdf](https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/INEC/IGUB/Diagnostico%20de%20salud%20Ambiental%20compilado.pdf)
- Hurtado, S. (2014). *CONSUMO DE SUSTANCIAS PSICOACTIVAS EN JOVENES ESCOLARIZADOS ENTRE 12 A 17 AÑOS, DEL MUNICIPIO DE SOGAMOSO 2012*. [Universidad Nacional de Colombia]. <https://core.ac.uk/download/pdf/77273145.pdf>
- IBOCA. (2021). *Mapa de calidad del aire de Bogotá*. <http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa/>
- IDEAM. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2011 – 2015*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023637/Informe_del_Estado_de_la_Calidad_del_Aire_en_Colombia_2011-2015_vfinal.pdf
- IDEAM. (2017). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2016*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –. <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/3.+Informe+del+Estado+de+la+Calidad+del+Aire+en+Colombia+2016.pdf/fb3eee92-6bcf-4979-9ea2-de0101496a2f?version=1.0>
- IDEAM. (2018). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2017*. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023844/Informe_ECalidadl_Aire_2017.pdf
- IDEAM. (2019). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia - 2018*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –. http://www.andi.com.co/Uploads/Informe_estado_calidad_del_aire_2018.pdf
- IDEAM. (2021a). *SISAIRE - IDEAM*. <http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/consultas.xhtml>

- IDEAM. (2021b). *Sistema de Información sobre la calidad del aire (SISAIRE)*.
- INS. (2019). Boletín Epidemiológico - Todos los documentos. In *Instituto nacional de salud*. <https://www.ins.gov.co/buscador-eventos/boletinepidemiologico/forms/allitems.aspx>
- Isaza, D. R., Cataño, J. S., Escobar, D. M., & Ciro, É. M. (2019). Problemática de la contaminación del aire en Colombia. *Revista Ambiental ÉOLO*, 18(1). <http://revistaeolo.fconvida.org/index.php/eolo/article/view/12>
- Jr, A. C. O., & Rocha, J. L. (2020). Poluição do Ar e Doenças Respiratórias: estudo de correlação das emissões atmosféricas e impacto nas cidades de Duque de Caxias (RJ) e Petrópolis (RJ) entre 2013 e 2017. *GEOGRAFIA (Londrina)*, 29(2), 219–239. <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2020v29n2p219>
- Lemoine, R., García, M., Cumsille, F., Ahumada, G., Cardillac, J., Fagua, C., Scoppetta, O., Arenas, N., & León, M. (2014). *ESTUDIO NACIONAL DE CONSUMO DE SUSTANCIAS PSICOACTIVAS EN COLOMBIA - 2013*. Este estudio fue realizado por el Gobierno Nacional de la República de Colombia, a través del Ministerio de Justicia y del Derecho - Observatorio de Drogas de Colombia y el Ministerio de Salud y Protección Social, con el apoyo de la Oficina de las Naciones Unidas. https://www.unodc.org/documents/colombia/2014/Julio/Estudio_de_Consumo_UNODC.pdf
- Liu, J., Zheng, Y., Geng, G., Hong, C., Li, M., Li, X., Liu, F., Tong, D., Wu, R., Zheng, B., He, K., & Zhang, Q. (2020). Decadal changes in anthropogenic source contribution of PM_{2.5} pollution and related health impacts in China, 1990-2015. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 20, 7783–7799. <https://doi.org/10.5194/acp-20-7783-2020>
- Lolli, S., Chen, Y.-C., Wang, S.-H., & Vivone, G. (2020). Impact of meteorological conditions and air pollution on COVID-19

- pandemic transmission in Italy. *Scientific Reports*, 10(1), 16213. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-73197-8>
- Magazzino, C., Mele, M., & Schneider, N. (2020). The relationship between air pollution and COVID-19-related deaths: An application to three French cities. *Applied Energy*, 279, 115835. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115835>
- Manahan S.E. (2007). *Introducción a la química ambiental*.
- Mannucci, P. M., & Franchini, M. (2017). Health Effects of Ambient Air Pollution in Developing Countries. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(9), 1048. <https://doi.org/10.3390/ijerph14091048>
- Martínez, R., Salas, J., Albor, L., Montenegro, W., Mathiasen, B., Dueñas, M., Sossa, G., Barreto, G., Ardila, F., & Zambrano, A. (2018). *Caracterización-consumo-drogas-Sta-Marta.pdf*. <http://www.odc.gov.co/Portals/1/publicaciones/pdf/consumo/estudios/locales/Caracterización-consumo-drogas-Sta-Marta.pdf>
- Matus, K., Nam, K.-M., Selin, N. E., Lamsal, L. N., Reilly, J. M., & Paltsev, S. (2011). *Health damages from air pollution in China*. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.08.006>
- Meselson, M. (2020). Droplets and Aerosols in the Transmission of SARS-CoV-2. *New England Journal of Medicine*, 382(21), 2063–2063. <https://doi.org/10.1056/nejmc2009324>
- Resolución 2254, (2017). <https://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf>
- Minsalud. (2020). *Páginas - Cifras de aseguramiento en salud*. <https://www.minsalud.gov.co/proteccionsocial/Paginas/cifras-aseguramiento-salud.aspx>
- Morales-Bárceñas, R., Chirino, Y. I., Sánchez-Pérez, Y., Osornio-Vargas, Á. R., Melendez-Zajgla, J., Rosas, I., & García-Cuellar, C. M. (2015). Particulate matter (PM10) induces metalloprotease activity and invasion in airway epithelial

- cells. *Toxicology Letters*, 237(3), 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2015.06.001>
- Norman, D., & Harry, S. (1998). *Applied Regression Analysis, Third Edition* (3rd ed.). <https://www.pdfdrive.com/applied-regression-analysis-third-edition-e168557180.html>
- OMS. (2018). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. In *Organización mundial de la salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- OSPS. (2020). Observatorio de Salud Pública de Santander. In *Observatorio de Salud Pública de Santander*. <http://web.observatorio.co/>
- Pardo, C., & Piñeros, M. (2011). Consumo de tabaco en cinco ciudades de Colombia, Encuesta Mundial de Tabaquismo en Jóvenes, 2007. *Biomédica*, 30(4), 509. <https://doi.org/10.7705/biomedica.v30i4.289>
- Pineda, L. (2017). *INFORME DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN COLOMBIA 2017 LOS CASOS DE BOGOTÁ Y MEDELLÍN*. IDEAM. http://www.foronacionalambiental.org.co/wp-content/uploads/2011/09/Leonardo-Pineda-Informe_Estado_Calidad_Aire-2017_FORO.compressed.pdf
- PNUD. (2020). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Porras, A., Rico, A., Ardila, A., Mendieta, J., Ramirez, D., Coy, E., Moyano, D., Abella, J., Galvez, A., & Osorio, E. (2019). *Carga de enfermedad atribuible a contaminación extramural e intramural del aire en Bogotá*. [http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Boletines epidemiologicos/2019/BED_Vol_16.pdf](http://www.saludcapital.gov.co/DSP/Boletines%20epidemiologicos/2019/BED_Vol_16.pdf)
- Rayén Quiroga. (2016). *Indicadores Ambientales de los ODS: avances y desafíos en América Latina y el Caribe*.
- Represa, N. S., Ojeda, S., Abril, G., & Garcia Ferreyra, M. F. (2019). Satellite Product Evaluation of the OMI/AURA Sensor for the

Nitrogen Dioxide Analysis in the Province of Buenos Aires. *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2018*. <https://doi.org/10.1109/ARGENCON.2018.8645993>

Rico Hernández, A., Molina Gómez, N. I., & Alvarez Berrio, J. A. (2015). *Determinación de las concentraciones de Cadmio y Plomo presentes en muestras de material particulado y correlación con los casos de enfermedades respiratorias en el corregimiento Belencito municipio de Nobsa (Boyacá)*. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/27510>

Rico Melo, Y. P., & Torres Salcedo, C. D. (2018). *Evaluación de la calidad de aire por inmisión de PM10 y su correlación con las enfermedades respiratorias reportadas para el año 2016 en el área urbana municipio de Ráquira, Boyacá*. <http://repositorio.unbosque.edu.co/handle/20.500.12495/3240>

RMCAB. (2020). *Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá*. <http://rmcab.ambientebogota.gov.co/home/map>

Rodríguez-Camargo, L. A., Sierra-Parada, R. J., & Blanco-Becerra, L. C. (2020). Spatial analysis of PM2.5 concentrations in Bogota according to the World Health Organization air quality guidelines for cardiopulmonary diseases, 2014-2015. *Biomedica*, 40(1), 137–152. <https://doi.org/10.7705/biomedica.4719>

Rodríguez-Villamizar, L. A., Belalcazar-Ceron, L. C., Fernández-Niño, J. A., Marín-Pineda, D. M., Rojas-Sánchez, O. A., Acuña-Merchán, L. A., Ramirez-Garcia, N., Mangones-Matos, S. C., Vargas-Gonzalez, J. M., Herrera-Torres, J., Agudelo-Castañeda, D. M., Piñeros Jiménez, J. G., Rojas-Roa, N. Y., & Herrera-Galindo, V. M. (2020). Air pollution, sociodemographic and health conditions effects on COVID-19 mortality in Colombia: An ecological study. In *medRxiv* (p. 2020.07.22.20159293). medRxiv. <https://doi.org/10.1101/2020.07.22.20159293>

Rodríguez, N., Segura, A., Chacón, N., & Rosero, A. C. N.-O. D. E. S. D. E. B. S. I. D. E. G. C. D. (2020). *Pirámide poblacional*

- de Bogotá D.C. https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/fichas_tecnicas_osb/demografia/OSB_Demografia-PiramideBogotaLocalidades.pdf
- Rosselli, D. (2020). EPIDEMIOLOGÍA DE LAS PANDEMIAS. In *Medicina* (Vol. 42, Issue 2). <https://revistamedicina.net/ojsanm/index.php/Medicina/article/view/1511/1908>
- SALUDATA. (2020a). *Afiliación régimen aseguramiento*. <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/index.php/datos-de-salud/ofertas-de-servicios-de-salud/afiliacion-regimen/>
- SALUDATA. (2020b). *Casos confirmados de COVID-19*. <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/index.php/datos-de-salud/enfermedades-trasmisibles/covid19/>
- SALUDATA. (2020c). *Infecciones respiratorias agudas*. <https://saludata.saludcapital.gov.co/osb/index.php/datos-de-salud/enfermedades-trasmisibles/mortalidad-ira/>
- Sánchez-Colomer, J. M. G. (2010). *STATGRAPHICS® Centurion XVI Manual de usuario*. 305. <http://files/382/Sánchez-Colomer-StatPointTechnologies,Inc.pdf>
- Sánchez, J., Urrego, J., Zakzuk, J., Bornacelly, A., Castro, I., & Caraballo, L. (2013). Levels of air pollution in Cartagena, Colombia. *Revista de La Universidad Industrial de Santander. Salud*, 45(3), 35–44. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0121-08072013000300004&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- SDP. (2021). *Secretaría Distrital de Planeación*. <http://www.sdp.gov.co/>
- Setti, L., Passarini, F., De Gennaro, G., Baribieri, P., Perrone, M. G., Borelli, M., Palmisani, J., Di Gilio, A., Torboli, V., Pallavicini, A., Ruscio, M., PISCITELLI, P., & Miani, A. (2020). SARS-Cov-2 RNA Found on Particulate Matter of Bergamo in Northern Italy: First Preliminary Evidence. *MedRxiv*, 2020.04.15.20065995. <https://doi.org/10.1101/2020.04.15.20065995>

- SIATA. (2020). *SIATA - Sistema de Alerta Temprana del valle de Aburrá*. https://siata.gov.co/siata_nuevo/
- SISPRO, & Minsalud. (2020). *Reportes CARACTERIZACION*. <http://rssvr2.sispro.gov.co/caracterizacion/>
- Ubilla, C., & Johannessen, K. (2017). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EFECTOS EN LA SALUD RESPIRATORIA EN EL NIÑO. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.rmclc.2016.12.003>
- Wu, X., Nethery, R. C., Sabath, B. M., Braun, D., & Dominici, F. (2020). Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide cross-sectional study. *MedRxiv*, 2020.04.05.20054502. <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>
- Yao, Y., Pan, J., Wang, W., Liu, Z., Kan, H., Meng, X., & Wang, W. (2020). Spatial Correlation of Particulate Matter Pollution and Death Rate of COVID-19. *MedRxiv*, 2020.04.07.20052142. <https://doi.org/10.1101/2020.04.07.20052142>
- Zheng, P., Liu, Y., Song, H., Wu, C.-H., Li, B., Kraemer, M. U. G., Tian, H., Yan, X., Zheng, Y., Stenseth, N. C., Dye, C., & Jia, G. (2020). Risk of COVID-19 and long-term exposure to air pollution: evidence from the first wave in China. *MedRxiv*, 2020.04.21.20073700. <https://doi.org/10.1101/2020.04.21.20073700>
- Zhu, Y., Xie, J., Huang, F., & Cao, L. (2020). Association between short-term exposure to air pollution and COVID-19 infection: Evidence from China. *Science of The Total Environment*, 727, 138704. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138704>
- Zoran, M. A., Savastru, R. S., Savastru, D. M., & Tautan, M. N. (2020). Assessing the relationship between surface levels of PM2.5 and PM10 particulate matter impact on COVID-19 in Milan, Italy. *Science of The Total Environment*, 738, 139825. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139825>

Capítulo 10

Estudio de la relación de uso de agroquímicos elaborados a base de carbamatos en cultivos de cebolla, con la salud de agricultores en el municipio de Aquitania Boyacá¹⁰

Study of the relationship between the use of carbamate-based agrochemicals in onion crops and the health of farmers in the municipality of Aquitania Boyacá.

¹⁰ Autores: Pacheco García, Brigid Hiomara, Daza Pedraza, Andrés Sebastián, Vargas Salas, Guillermo Eduardo, Yuddy Alejandra Castro Ortegón, Pedro Mauricio Acosta Castellanos. Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. Colombia

RESUMEN

El envenenamiento en el ser humano por uso inadecuado de agroquímicos en la producción de alimentos, se ha convertido en un problema significativo en el entorno ambiental y de salud pública; generando consecuencias en agricultores y consumidores. El presente capítulo aborda las afectaciones que produce el pernicioso manejo de agroquímicos elaborados a base de carbamatos en la salud de agricultores productores de cebolla ubicados en el Municipio de Aquitania Boyacá, basándose en información recolectada en campo por medio de la aplicación de encuestas a operarios agrícolas que hacen uso de esta clase de insumos. El estudio identificó los pesticidas más utilizados en el municipio de interés, así como en otros municipios con vocaciones agrícolas semejantes, consiguiente a ello se tuvieron en cuenta variables como la frecuencia de fumigación, tiempo de exposición, elementos de protección personal y edad del trabajador; información que fue relacionada con las alteraciones o señales de intoxicaciones manifestadas por la población encuestada, por medio de correlaciones a partir del método Rho de Spearman. Así mismo, se determinó el nivel de intoxicaciones, asociando los síntomas manifestados por la muestra con la escala POISONING SEVERITY SCORE (PSS) IPCS/EAPCCT de la Organización Mundial de la Salud.

Palabras Clave: Agricultor, Agroquímico, Afectación, Correlación, Envenenamiento.

ABSTRACT

Human poisoning due to the inappropriate use of agrochemicals in food production has become a significant environmental and public health problem, with consequences for farmers and consumers. This chapter addresses the effects of the pernicious handling of carbamate-based agrochemicals on the health of onion farmers located in the municipality of Aquitania Boyacá, based on information collected in the field through the application

of surveys to agricultural operators who use this type of inputs. The study identified the most used pesticides in the municipality of interest, as well as in other municipalities with similar agricultural vocations. Consequently, variables such as frequency of fumigation, exposure time, personal protection elements and age of the worker were considered; information that was related to the alterations or signs of intoxications manifested by the surveyed population, by means of correlations based on Spearman's Rho method. Likewise, the level of intoxication was determined by associating the symptoms manifested by the sample with the POISONING SEVERITY SCORE (PSS) IPCS/EAPCCT scale of the World Health Organization.

Key words: Farmer, Agrochemical, Affect, Correlation, Poisoning.

1. Introducción

Boyacá, es considerado como uno de los principales departamentos productores agrícolas en Colombia (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD, 2011), en efecto, es reconocido por heredar la vocación agrícola entre generaciones, logrando ser a través del tiempo una de las principales expensas alimenticia para el país (Pacheco et al., 2012), por ende, la economía boyacense es dinamizada por la producción agrícola, resultado del desarrollo de las diferentes cadenas agrarias que son ejecutadas al interior del departamento (GOBERNACIÓN DE BOYACÁ, 2019), como consecuencia, la tradición campesina asegura que el rendimiento de la siembra sea alto por medio de la aplicación de sustancias químicas especializadas en el agro, como prevención ante posibles pérdidas financieras y mercantiles (Arias Gómez & Antosová, 2015).

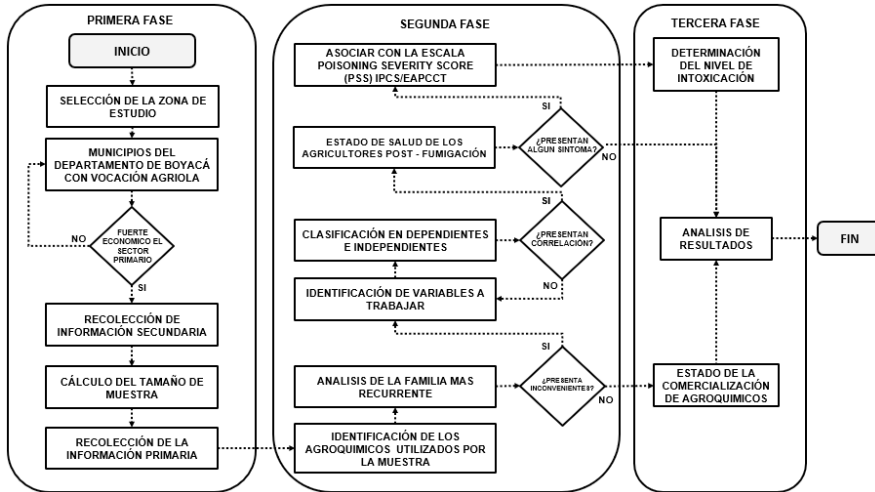
Actualmente la implementación de agroquímicos se ha visto en aumento, debido a que tales sustancias se han considerado indispensables para el manejo de los cultivos (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Gobierno de Colombia, 2009), dentro de las principales familias de estas sustancias químicas se encuentran los carbamatos, clorados y organofosforados, por lo que su estructura permite múltiples beneficios a la planta (Convenio de Rotterdam et al., 2014), sin embargo por el uso inapropiado de pesticidas se han presentado afectaciones

ambientales y de salud pública; como consecuencia se presentan enfermedades que afectan considerablemente a poblaciones, seguido de un deterioro continuo en los recursos y patrimonios ambientales locales (Ordoñez, 2010). El municipio de Aquitania (Boyacá) es conocido a nivel departamental, por desarrollar en su interior monocultivos intensivos dominantes de cebolla de rama, donde más del 70% de la población se dedica a esta labor agrícola (Russi-Díaz, 2017), por otro lado, los municipios de Moniquirá y Vantaquemada, son jurisdicciones catalogadas pioneras en el sector agrícola a nivel departamental, por lo que su vocación ocupa más del 50% de la economía, en vista de que las condiciones ambientales de las zonas son ideales para el buen crecimiento de los cultivos, (GOBERNACIÓN DE BOYACÁ, 2019).

El estudio planteó como objetivo general relacionar las afectaciones de salud manifestadas por los agricultores de cebolla del municipio de Aquitania Boyacá, con el uso de agroquímicos elaborados a base de carbamatos, tomando como municipios de control a Moniquirá y Ventaquemada. La metodología se basó en la aplicación de métodos estadísticos, como el Coeficiente Alpha de Cronbach y el método de Rho de Spearman para validar y correlacionar las variables de estudio, así mismo, se empleó información suministrada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) principalmente la escala estandarizada POISONING SEVERITY SCORE (PSS) IPCS/EAPCCT, con el fin de determinar si se presentan intoxicaciones a raíz de la mala implementación de las sustancias de referencia en la zona de estudio.

2. Metodología

Gráfico 1. Flujograma Metodológico



2.1 Primera Fase

La primera fase de la metodología se basó en la selección y recolección de información en el sector agrícola; para este segmento se tuvo en cuenta un proceso sistemático, que permitiera realizar las acciones más eficientes y eficaces, de tal forma que la recopilación de datos fuese coherente ágil posible (Gallardo de Parada & Moreno Garzón, 1999).

2.1.1 Selección de la Zona de Estudio

Se tomó en cuenta las jurisdicciones boyacenses que se caracterizan por desarrollar una economía basada en el agro, junto a los consumos per cápita de alimentos que conforman la canasta familiar colombiana.

2.1.1.1 Zona de Importancia y zonas de Control

La elección de la zona de importancia para la investigación se toma a partir de la cantidad de sustancia químicas mínimas aplicadas a los cultivos previamente seleccionados, de acuerdo a lo anterior, se analiza el manejo de las respectivas siembras, por medio de documentos expedidos de entidades como el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) y diferentes autores de investigaciones enfocadas al objeto, logrando identificar el cultivo con mayor y menor necesidad química.

2.1.2 Recolección de Información Secundaria

La información Secundaria se obtuvo de investigaciones, informes, planes, censos, información estadística, bases de datos y todo escrito elaborado por terceros (Gallardo de Parada & Moreno Garzón, 1999), dando prioridad a documentación expedida por autoridades de seguimiento y control a nivel nacional y departamental.

2.1.3 Cálculo del Tamaño de Muestra

Se realizó un cálculo para determinar el tamaño de la muestra, siendo este valor, representativo respecto al total de los habitantes de la zona de estudio, en investigaciones donde la variable principal es de tipo cualitativo con individuos finitos, la proporción de población a estudiar es calculada con la siguiente fórmula (Aguilar-Barojas, 2005).

Fórmula 1, Determinación del tamaño de la Muestra

$$(1) \quad n = \frac{N * Z^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

Fuente: (Aguilar-Barojas, 2005)

Donde:

- N = Tamaño de la población de referencia
- p = Proporción aproximada del fenómeno en estudio en la población de referencia
- q = Proporción de la población de referencia que no presente el fenómeno (1 – p)
- Z = Nivel de Confianza
- d = Precisión Absoluta

Considerando lo anterior, los parámetros de (p) y (q) se obtuvieron del Análisis de Situación de Salud (ASIS), documento expedido por la Secretaria de Salud de Boyacá donde se afirma el estado de sanidad de la población municipal, dando relevancia a las enfermedades y las principales causas de morbilidad de los individuos (Ministerio de la Salud y la Protección Social, 2014), por otro lado, los parámetros referentes al nivel de confianza (Z) y la Precisión Absoluta (d), se tomaron de valores ya determinados por el método, siendo los siguientes.

Tabla 1. Valores del nivel de confianza y precisión absoluta

NIVEL DE CONFIANZA	ERROR	VALOR DE (Z)	VALOR DE (d)
99%	1%	2.58	0.001
95%	5%	1.96	0.05
90%	10%	1.645	0.1

Fuente: (Aguilar-Barojas, 2005)

2.1.4 Recolección de Información Primaria

La información primaria es aquella que se recolecta teniendo contacto directo con el objeto de estudio (Gallardo de Parada & Moreno Garzón, 1999); es por ello que se realizó la aplicación de encuestas en las zonas previamente seleccionadas, siendo los agricultores la población apta para alimentar y enriquecer esta clase de información, puesto que estos individuos de referencia,

hacen uso de productos químicos elaborados especialmente para ser implementados en siembras de alimentos.

2.1.4.1 Validación de Información (Coeficiente Alpha de Cronbach).

Dos características importantes al momento de procesar información primaria es la confiabilidad y la validez de los datos, para determinar estas características el coeficiente α (Alpha) de Cronbach se convierte en un método competente (Quero Virla, 2010), considerando que, dicho coeficiente es el producto de la media de las correlaciones que tienen todas las variables recolectadas en campo (Cozby, 2018). Del mismo modo el coeficiente permitió realizar un análisis interno de la información logrando determinar con precisión las variables exactas que tienen relevancia en el estudio (Frías-Navarro, 2019), a continuación se encuentran los valores mínimos aptos para el Coeficiente de Cronbach

Tabla 2, Rangos de Aceptación para el Coeficiente de Cronbach

RANGO OPTIMO DEL COEFICIENTE	TIPO DE ESTUDIO
Mayor o Igual a 0.5	Investigación Básica
Mayor o Igual a 0.6	Investigación Exploratoria
Mayor o Igual a 0.7	Investigación Confirmatoria

Fuente: (Frías-Navarro, 2019)

Actualmente los asesores estadísticos son grandes bases de datos, realizan una multiplicidad de cálculos estadísticos de una manera rápida y precisa, facilitando el procesamiento de datos a individuos principiantes (SPSS Inc, 2010). Ahora bien, para el cálculo del Coeficiente de Cronbach se empleó el asesor estadístico **IBM® SPSS® Statistics**.

2.2 Segunda Fase

La segunda fase de la metodología hace referencia al procesamiento de la información recolectada en la etapa anterior, para este segmento se tuvo en cuenta la identificación de productos químicos de uso agrícola más utilizados por la muestra, analizando las características de cada uno (Clasificación, Clase Toxicológica y Estado), por otro lado, se observaron las afectaciones de salud de los agricultores y las variables que podían intervenir para fomentar la aparición de los síntomas manifestados por los agricultores en las encuestas.

2.2.1 Identificación de los Agroquímicos Empleados por la Muestra

En esta parte se realizó una depuración de la información recolectada en el ítem 2.1.4 (Recolección de Información Primaria), donde se tomó como base los pesticidas utilizados por la muestra encuestada en los tres municipios de Boyacá escogidos previamente, para luego identificar las siguientes características.

2.2.1.1 Clase de Agroquímico:

La clasificación de los productos químicos de uso agrícola fue un factor importante para el estudio, ya que dichas agrupaciones de pesticidas ayudaron a la obtención de un análisis de las afectaciones que se lograron encontrar en la muestra de agricultores, teniendo como base las estructuras químicas y antecedentes de cada uno de ellos **(Cid, 2014); a nivel mundial se tomó como referencia el tipo de plaga que combate la mezcla de sustancia química obteniendo tres grandes grupos (Bedmar, 2006), siendo los siguientes.**

Tabla 3, Clasificación de Agroquímicos según el tipo de plaga

CLASE	TIPO DE PLAGAS
Insecticidas	Insectos, Artrópodos y Vertebrados
Fungicidas	Hongos y Patógenos
Herbicidas	Plantas no Cultivadas (Maleza)

Fuente: (Bedmar, 2006)

2.2.1.2 Categoría Toxicológica de los Agroquímicos.

Los riesgos que tiene un individuo por el uso de pesticidas son altos, ya que puede tener como consecuencia la toxicidad de órganos o sistemas del cuerpo humano, logrando ingresar mediante acciones de ingestión, inhalación o absorción (Bartual & Berenguer, 1983). Se analizó la Categoría Toxicológica de los Agroquímicos encontrados, tomando como referencia documentación expedida por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) siendo para el caso de Colombia la máxima Autoridad Nacional Competente (ANC), a continuación se observa la clasificación toxicológica de los plaguicidas.

Tabla 4, Clasificación Toxicológica de los Agroquímicos

CATEGORIA	SIGNIFICADO
Categoría I	Extremadamente Peligroso
Categoría II	Altamente Peligroso
Categoría III	Medianamente Peligroso
Categoría IV	Ligeramente Peligroso

Fuente: (Organization World Health, 2010)

2.2.1.3 Estado actual de los Agroquímicos.

En Colombia, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), basado en la reglamentación vigente según la Norma Andina y la Regulación Nacional, realiza pruebas de eficacia agronómica para alimentar un proceso de evaluación, como requisito para

la elaboración, comercialización y aplicación de productos químicos de uso agrícola para los diferentes cultivos nacionales, logrando que estos productos obtengan una ampliación o cancelación de uso en el país, sin embargo, se tiene una etapa para mejorar dichas mezclas químicas contando con un periodo de reevaluación (Instituto Colombiano Agropecuario, 2018); al analizar y observar esta condición se puede determinar el control que tiene las ANC para el ciclo de vida de los pesticidas utilizados, como base se tienen los registros de venta de plaguicidas químicos de uso agrícola anuales expedidos por la autoridad nacional competente.

2.2.1.4 Nivel de Riesgo de Agricultores.

Para determinar el Nivel de Riesgo que obtiene la población con vocación agrícola al momento de manipular esta clase de sustancias químicas especializadas para la agricultura, se tomó como referencia lo dispuesto en la Guía Técnica Colombia (GTC) 45. Para el cálculo del **Nivel de Riesgo (NR)** se basó en las practicas que tienen los agricultores al momento de fumigar los cultivos, en donde el individuo tiene contacto directo con la sustancia química; en primer lugar se tuvo en cuenta el **Nivel de Defidencia (ND)** y el **Nivel de Exposición (NE)**, por lo que el análisis de los resultados obtenidos a través de las encuestas fue fundamental, pues se observó el comportamiento del uso de elementos de protección personal (EPP) y la frecuencia con que se realizan las fumigaciones a los cultivos, procediendo a hacer uso de la fórmula 2 correspondiente a el **Nivel de Probabilidad (NP)**.

Fórmula 2, Nivel de Probabilidad (NP)

$$(2) \text{ NP} = \text{ND} * \text{NE}$$

Fuente: (Instituto Colombiano de Normas Técnica y Certificación, 2010)

Respecto al valor obtenido del **Nivel de Probabilidad (NP)**, se observó el rango en que se encuentra, siendo Bajo, Medio, Alto o

Muy Alto; de igual forma, se realizó el mismo proceso para hallar el **Nivel de Riesgo (NR)**, ya que es el resultado de la aplicación de la Fórmula 3, teniendo como factores el **Nivel de Probabilidad (NP)** previamente hallado y el **Nivel de Consecuencia (NC)** tomando como referencia los síntomas manifestados por los agricultores.

Fórmula 3, Nivel de Riesgo (NR)

$$(3) NR = NP * NC$$

Fuente: (Instituto Colombiano de Normas Técnica y Certificación, 2010)

Conociendo el valor del **Nivel de Riesgo (NR)**, se posiciono en el rango correspondiente (Nivel I al Nivel IV).

2.2.2 Análisis de la Familia de los Agroquímicos Empleados por la Muestra

Periódicamente al mercado ingresan nuevos pesticidas, elaborados con base en una estructura química específica, siendo la referencia clave para posicionarse con precisión en una familia de estas clases de mezclas químicas para el uso agropecuario, dentro de esta clasificación los grupos más comunes e implementados son los Clorados, Organofosforados y Carbamatos, siendo núcleo de diversas pruebas de calidad (Cid, 2014), actualmente por estudios e investigaciones se ha logrado determinar que algunas familias químicas producen afectaciones de salud a la población que se encuentre expuesta a estas sustancias (Manzur et al., 2015); con respecto a lo anterior, se toma en cuenta la familia de los productos químicos utilizados por la muestra, dando relevancia a la familia más encontrada en la depuración de la información secundaria.

2.2.3 Identificación de Variables a Trabajar

Los procedimientos estadísticos se han creado para probar si es relevante o no el grado de la relación entre dos o más variables, en otras palabras, si a la relación que se determina con las variables se le puede dar una explicación realizando un procedimiento aleatorio, o por el contrario se tiene que aplicar métodos exactos para llegar al mismo fin (Paredes, 2009). Por esto, fue importante la identificación de variables, logrando determinar el tipo (Cuantitativo o Cualitativo) y escala de medición (Ordinal – Nominal – De Intervalo – De Razón o Relación) que tiene cada una de las variables trabajadas

2.2.4 Clasificación de Variables Dependientes e Independientes

La determinación de la dependencia de cada variable obtiene un alto grado de relevancia, puesto que, al tener mayor claridad en este punto, se pudo lograr un acercamiento directo a la relación que tienen los síntomas manifestados por los agricultores y el uso de productos químicos especializados para el agro, logrando identificar algunos errores cometidos por los trabajadores agrícolas al momento de emplear tales sustancias a los cultivos, visto de esta forma, esta clasificación se convierte en una subordinación de los resultados obtenidos en la correlación de variables

2.2.4.1 Correlación de Variables.

La correlación de variables se realizó para determinar la fuerza con que se asocian dos o más variables para relacionarse entre sí, en efecto, el método de Rho de Spearman fue el más óptimo para este caso, por lo que, permitió conocer el grado de asociación entre ambas variables teniendo como referencia la clasificación de las posibles relaciones obtenidas y observadas en la Tabla 5. Este método puntúa desde (+1) hasta (-1), significando que el

valor cero (0) es una correlación nula y el valor uno (+1) o menos uno (-1) es una correlación perfecta. (Ortega, 2009).

Tabla 5, Grados de Relación Según Coeficiente de Correlación de Rho de Spearman

RANGO	RELACIÓN
0.91 - 1.00	Correlación Perfecta
0.76 - 0.90	Correlación Muy Fuerte
0.51 - 0.75	Correlación Considerable
0.11 - 0.50	Correlación Media
0.01 - 0.10	Correlación Débil
0.00	Correlación Nula

Fuente: (Mondragon, 2000)

El método de correlación de Rho de Spearman permitió detectar la dependencia de las dos variables enfrentadas, y el signo que acompaña el valor de la correlación pudo determinar la proporcionalidad de las variables, siendo el signo positivo (+) directamente proporcionales y el signo negativo (-) inversamente proporcionales (Mondragon, 2000). En función a lo planteado la fórmula aplicada es la siguiente.

Fórmula 4, Método de Rho de Spearman

$$(4) r_s = 1 - \frac{6 * \sum d^2}{n * (n - 1)}$$

Fuente: (Ortega, 2009)

Siendo:

- n = La cantidad de Sujetos que se Clasifican
- Xi = El rango de Sujetos i con respecto a una variable
- Yi = El rango de Sujetos i con respecto a la segunda variable
- di = (Xi - Yi) es decir, es la diferencia entre los rangos de X e Y

De igual forma, se empleó el asesor estadístico **IBM® SPSS® Statistics**, con el fin de obtener los valores de las correlaciones entre las variables de estudio, determinando la dependencia y proporcionalidad de cada una de ellas.

2.2.5 Estado de Salud de los Agricultores Post – Fumigación

La población agricultora se ha convertido en una comunidad vulnerable por ser afectada con una serie de riesgos asociados al uso de plaguicidas (Jiménez Quintero et al., 2016), pues el manejo productos químicos especializados en el agro, han afectado su salud, presentando sensaciones y alteraciones en órganos y sistemas del cuerpo humano (Greenpeace, 2015). Teniendo en cuenta la información recolectada en campo se observaron los síntomas manifestados por los encuestados, realizando una asociación con la escala estandarizada Poisoning Severity Score (PSS) IPCS/EAPCCT, con el objetivo de conocer el nivel de intoxicación que tiene el agricultor después de mantenerse expuesto a la sustancia química.

2.2.5.1 Asociación con la Escala Poisoning Severity Score (PSS) IPCS/EAPCCT

En la escala estandarizada expedida por la Organización Mundial de la Salud se localiza el síntoma o signo más severo manifestados por el individuo, para luego determinar el grado de severidad que tiene la intoxicación y el sistema que se afecta en el cuerpo humano por la reacción fisiológica causada, resultado de la exposición a sustancias químicas de uso agrícola. Cabe resaltar que la Poisoning Severity Score (PSS) IPCS/EAPCCT, determina cinco (5) grados de severidad, siendo los siguientes (Persson et al., 2018):

- 1. Nula (0):** Sin síntomas ni signos vinculados a la Intoxicación

2. **Leve (1):** Síntomas leves, transitorios y de resolución espontánea
3. **Moderada (2):** Síntomas marcados o persistentes
4. **Severa (3):** Síntomas de riesgo vital
5. **Fatal (5):** Los síntomas causan la muerte al individuo

Cabe resaltar que se debe basar solamente en los síntomas manifestados por el encuestado, sin tener en cuenta los riesgos y/o peligrosidad que tenga la persona al exponerse a la sustancia química.

2.3 Tercera Fase

La tercera fase de la metodología se enfocó en el análisis del procesamiento de la información primaria y secundaria, dando respuesta a la problemática planteada, logrando obtener una relación clara entre los síntomas presentados por la población con vocación agrícola y el uso de sustancias químicas especializadas en la agricultura.

3. Resultados y discusión

3.1 Localización de la Zona de Estudio

El Departamento de Boyacá se caracteriza por tener una tradición y vocación agrícola, entre ellas se encuentran siembras de alimentos que tienen alto consumo per cápita en la nación, según el Plan Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional, afirma que la canasta familiar colombiana está conformada por una serie de alimentos básicos, entre ellos se encuentran productos clasificados como cereales, leguminosas, hortalizas, tubérculos y azúcares, por otro lado, la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA) determina el consumo per cápita

de cada uno de estos alimentos, la tabla 6 se observa dicha información.

Tabla 6, Principales alimentos de la canasta familiar colombiana

GRUPO	ALIMENTO	CONSUMO PER CÁPITA
Cereal	Arroz	39 Kg – Hab/año
Leguminosa	Arveja	2 Kg – Hab/ año
Fruta	Naranja	17 Kg – Hab/ año
Hortaliza	Cebolla	78 Kg – Hab/año
Tubérculo	Papa Sabanera	61 Kg – Hab/año
Azúcar	Panela	25 Kg -Hab/año

Fuente: (Gobierno Nacional de Colombia, 2019)

Alimentos como la cebolla, papa y panela son los productos más apetecidos por la población colombiana y ofertados por el departamento, así mismo, la cantidad de pesticidas para estos cultivos por cosecha - Hectárea tienen un valor de 60 Kg (Castellanos Castellanos, 2016), 10 Kg (Mejía & Castellanos, 2018) y 50 Kg (MAG, 1991) respectivamente, por ende, las zonas de estudio son los municipios de Aquitania, Moniquirá y Ventaquemada

3.1.1 Municipio de Aquitania Boyacá (Zona de Importancia)

Aquitania se encuentra localizado en la Provincia de Sugamuxi al oriente del departamento de Boyacá, limita al norte con los municipios de Cuitiva, Sogamoso y Mongua, al sur limita con San Eduardo, Zetaquirá y Páez, al oriente limita con Pajarito, Labranzagrande, Recetor y Chámeza, por último, al occidente limita con Tota, Cuitiva, San Eduardo y Zetaquirá; Aquitania cuenta con una extensión total de 943 kilómetros cuadrados, posee una altitud de 3.030 msnm y una temperatura media de 10°C, esta jurisdicción se caracteriza por estar dentro de una zona de sector turístico del centro del país, como principal nodo

turístico se encuentra el Lago de Tota, de igual forma, el sector económico se rige por la comercialización de productos agrícolas como la cebolla de rama (Alcaldía Municipal de Aquitania, 2016).

3.1.2 Municipio de Moniquirá Boyacá (Zona de Control)

Moniquirá está ubicado en el altiplano boyacense, este municipio limita al norte con las jurisdicciones de San José de Pare, por el oriente con los municipios de Arcabuco y Togüí, por el sur limita con los municipios de Santa Sofía y Gachantivá, por el Occidente con el departamento de Santander específicamente con el municipio de Barbosa; contiene una extensión total de 220 kilómetros cuadrados, se encuentra a 1.700 msnm, tiene una temperatura media de 19°C, la mayor actividad económica de Moniquirá es la agricultura, los principales cultivos que se ve en el municipio son de caña de azúcar y guayaba, por otro lado, la industria panelera y del bocadillo de las cuales es la generación de empleo en la zona (Alcaldía Municipal de Moniquirá, 2016).

3.1.3 Municipio de Ventaquemada Boyacá (Zona de Control)

Ventaquemada está ubicado en el sector sur occidente del departamento, la posición que posee el municipio es considerado como eje importante para el departamento, el municipio de Ventaquemada limita al norte con el municipio de Tunja y Samacá, por el oriente con los municipios de Boyacá, Jenesano y Nuevo Colon, por el sur limita con los municipios de Turmequé y Villapinzón, por el Occidente con los municipios de Guacheta, Lenguezaque y Villapinzón; el municipio de Ventaquemada contiene una extensión total de 159 kilómetros cuadrados, se encuentra a 2.642 msnm y tiene una temperatura media de 11°C. La mayor actividad económica en el municipio es la agroindustria, los principales cultivos que se observan en el municipio son de papa sabanera, maíz y entre otros cereales, por otra parte, el municipio de Ventaquemada tiene un gran aporte para la parte

comercial del departamento de Boyacá, ya que tiene un acceso directo con la capital colombiana (Bogotá D.C) (Alcaldía de Ventaquemada, 2016).

3.2 Tamaño de muestra poblacional

Para la determinación de la muestra poblacional representativa, fue necesario conocer en los habitantes la aparición de la variable de estudio. En el Análisis de Situación de Salud (ASIS), se encontraron discretizados en cinco (5) grupos las causas principales de morbilidad de la población, siendo la primera causa en la clasificación por enfermedades transmisibles y nutricionales, la segunda por condiciones perinatales, la tercera por enfermedades no transmisibles, la cuarta por lesiones y la quinta por condiciones mal clasificadas. (Ministerio de la Salud y la Protección Social, 2014), es por ello, que se tomó como base para determinar las incógnitas de “p” y “q”.

De la clasificación anterior, se tuvo en cuenta la tercera causa de morbilidad, siendo para los municipios de Aquitania, Moniquirá y Ventaquemada valores para “p” de 70%, 72% y 71% respectivamente, por ende, los valores de “q” son de 30%, 28% y 29% según corresponde. (Secretaria de Salud de Boyacá, 2019)

Tabla 7, Resultado del tamaño de muestra para cada municipio

VARIABLES	MUNICIPIOS		
	Aquitania	Moniquirá	Ventaquemada
Población de Referencia (N)	6614	7235	9682
Nivel de Confianza (Z) (90%)	1.645	1.645	1.645
Precisión Absoluta (d) (10%)	0.1	0.1	0.1
Población con fenómeno de estudio (p)	0.7	0.72	0.71
Población sin fenómeno de estudio (q)	0.3	0.28	0.29
Tamaño de Muestra (n)	56	54	55

Como se observa en la tabla 8, el tamaño de muestra es representativa respecto al número total de habitantes por municipio. Para la jurisdicción de Aquitania se recolectó información con un mínimo de 56 Individuos, así mismo para Monquirá con un mínimo de 54 y por último para Ventaquemada con un mínimo de 55 individuos.

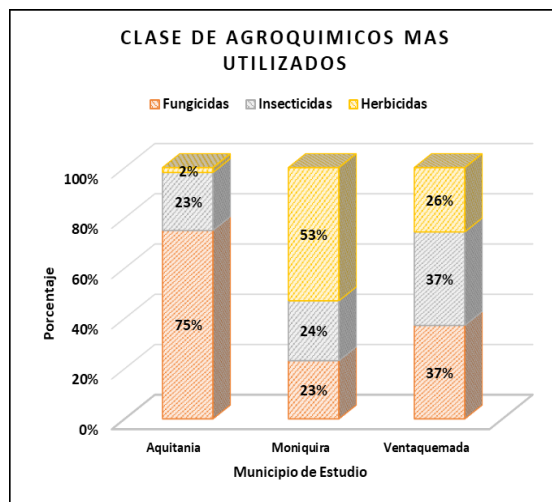
3.3 Identificación de los principales Agroquímicos

Para la identificación de los principales agroquímicos, se realizó la depuración y procesamiento de la información recolectada en campo y teniendo en cuenta información suministrada por entes de control territorial se obtuvieron los siguientes resultados.

3.3.1 Clase de Agroquímico más utilizado

En la Figura 2, se encuentran los resultados obtenidos que hacen alusión a la clase de agroquímicos utilizados por la muestra encuestada, encontrando que en las tres zonas de referencias se implementan todas las clases de pesticidas en diferentes proporciones.

Figura 2, Clase de Agroquímico más utilizado por la muestra



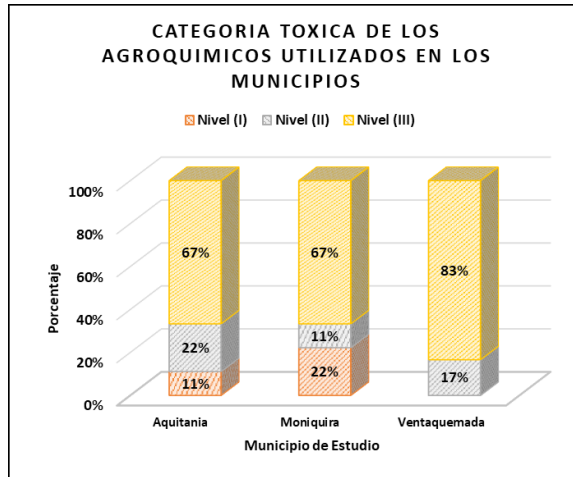
En el municipio de Aquitania el grupo de pesticidas más utilizado en los cultivos de la zona son los fungicidas con un valor de uso del 75%, siguiendo por los Insecticidas y herbicidas obteniendo valores de 23% y 2% respectivamente, mientras que, en el municipio de Moniquirá el grupo más implementado son los Herbicidas, con un valor de uso por la muestra del 53%, siguiendo con el uso de Fungicidas e Insecticidas teniendo valores de 24 % y 23% respectivamente. En el municipio de Ventaquemada se obtuvo que la muestra implementa Fungicidas e Insecticidas por igual, ya que cada grupo obtuvo un valor del 37%, siendo el 28% restante el uso de herbicidas. Basándose en lo anterior, el comportamiento obtenido en la clase de agroquímico utilizado por los individuos varía dependiendo el tipo de cultivos que se encuentren en la zona, sabiendo que en los municipios resaltan siembras de Cebolla, Caña de Azúcar y Papa (**GOBERNACIÓN DE BOYACÁ, 2019**)

3.3.2 Categoría Toxicológica de los Agroquímicos

Respecto a la categoría toxicológica, se evidencio que en los municipios de Aquitania y Moniquirá implementan pesticidas comprendidos como extremadamente tóxicos, de la misma forma, en las tres jurisdicciones boyacenses emplean pesticidas de categoría medianamente peligrosa como se ilustra en el gráfico 3, el municipio de Aquitania obtiene un porcentaje de 67% de uso de agroquímicos con cat. Toxicológica de tercer grado (III), siguiendo por la cat. Toxicológica de segundo grado (II) y la de primer grado (I), obteniendo valores de 27% y 11% respectivamente, igualmente el municipio de Moniquirá obtiene el mismo comportamiento, siendo la mayor cat. toxicológica encontrada la de tercer grado (III) con un 67%, seguido por el primer grado (I) y segundo grado (II) obteniendo valores de 22% y 11% respectivamente, por último, se nota que en el municipio de Ventaquemada emplea pesticidas con menor grado toxicológico, ya que en esta zona no se observa la presencia de sustancias químicas de uso agrícola con categoría toxicológica (I),

sin embargo, la categoría predominante es la de tercer grado (III) siguiendo la de segundo grado (II), obteniendo valores de 83% y 17% respectivamente.

Figura 3, Categoría Toxicológica de los Agroquímicos Implementados por la muestra



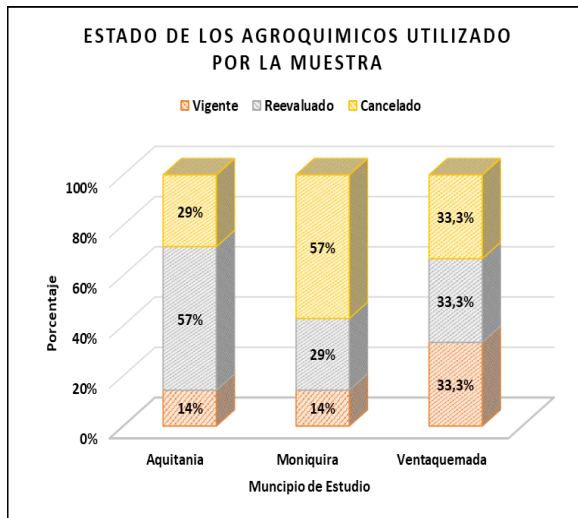
3.3.3 Estado actual de los Agroquímicos

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), siendo la autoridad nacional competente de Colombia debe hacer cumplir las normas expedidas por la Norma Andina, estableciendo criterios y procedimientos de evaluación de riesgo/beneficio de los productos químicos de uso agrícola (PQUA) registrados en la nación (Secretaría General, 2019), de acuerdo en los Registros de Venta, documentación expedida por el área de protección vegetal de la ANC Colombiana, se obtuvo que en las tres zonas implementan pesticidas de estado cancelado, reevaluado y vigente.

Como se evidencia en el gráfico 4, en el municipio de Aquitania (Boyacá), el 57% de sustancias químicas implementadas a los

cultivos del municipio se encuentran en estado reevaluado, seguido por el 29% de estado cancelado; por ende, el 14% restante hacen alusión a los agroquímicos de estado vigente, por otro lado, en el municipio de Moniquirá (Boyacá) el estado que predomina es el cancelado, obteniendo un valor del 57%, siguiendo por los estados de reevaluado y vigente, obteniendo valores de 29% y 14% respectivamente, En cambio, en el municipio de Ventaquemada se encontró un comportamiento distinto, ya que, en esta zona los tres estados posibles (vigente, reevaluado y cancelado), obtuvieron porcentajes iguales con valores de 33,3%; la razón de la aparición de agroquímicos con estados cancelados y reevaluados en los municipios de estudio es por los periodos de inscripción por parte de empresas y establecimientos que se encuentran involucradas en el ciclo de vida de estas sustancias químicas especializadas en el agro (Instituto Colombiano Agropecuario, 2003).

Figura 4, Estado de los Agroquímicos utilizados por la muestra



3.3.4 Nivel de Riesgo

En los municipios donde se desenvuelve la presente investigación, se identificaron y analizaron los peligros a los que se puede exponer la población con vocación agrícola; realizando la evaluación de riesgo (Tabla 8) se obtuvo los siguientes resultados

Tabla 8, Nivel de Riesgo de los Agricultores de cada Municipio

NIVEL	MUNICIPIO		
	Aquitania	Moniquirá	Ventaquemada
Deficiencia (ND)	6 (Alto)	2 (Medio)	2 (Medio)
Exposición (NE)	4 (Continua)	3 (Frecuente)	4 (Continua)
Probabilidad (NP)	24 (Muy Alto)	6 (Medio)	8 (Medio)
Consecuencia (NC)	10 (Leve)	10 (Leve)	10 (Leve)
Riesgo (NR)	240 (Nivel II)	60 (Nivel III)	80 (Nivel III)
Aceptabilidad	Aceptable con Control	Aceptable	Aceptable

El municipio de Aquitania se obtiene una magnitud superior en comparación de las zonas de control, teniendo un valor de riesgo de 240 unidades, significando un NR de segundo grado (II) siendo para la norma un nivel de riesgo **No Aceptable o Aceptable con Control**, por otro lado, el municipio de Moniquirá y Ventaquemada obtuvieron valores de 60 y 80 unidades, significando un NR de tercer grado (III) siendo para la norma un nivel de riesgo **Aceptable**.

Este resultado se debe a que en el municipio de Aquitania se estima el nivel de deficiencia Alto con 6 unidades; por lo que, basándose en la recolección de información primaria se determinó que los agricultores del municipio de importancia desconocen la mayoría de sugerencias realizadas por parte del fabricante, distribuidor y/o comercializador de esta clase de sustancias químicas de uso agrícola, omitiendo el buen uso de elementos de protección personal (EPP), mientras que a los

municipios de Moniquirá y Ventaquemada el nivel de deficiencia se le otorga como medio con 2 unidades, ahora bien, el nivel de probabilidad tiene en cuenta el ND, por ende, el municipio de Aquitania obtiene un valor mayor a comparación de los otras zonas, siendo para la jurisdicción de Aquitania el NP Muy Alto con 24 unidades, mientras que, las jurisdicciones de Moniquirá y Ventaquemada el NP Medio con 6 y 8 unidades respectivamente.

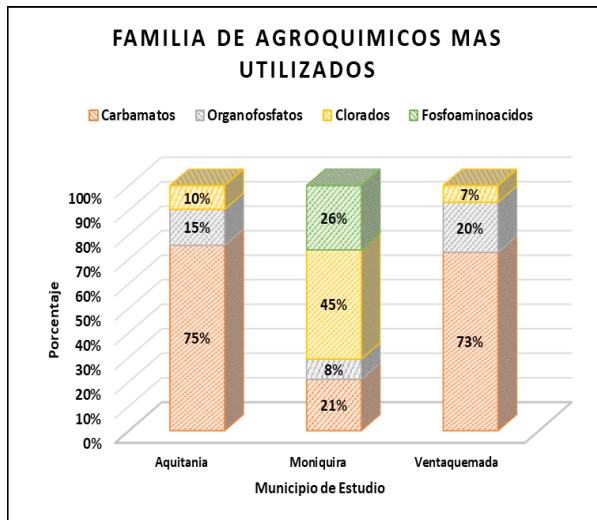
3.4 Análisis de la Familia más recurrente de Agroquímicos

En cuanto a la clasificación de agroquímicos por medio de la familia (grupo químico), se observó a grosso modo que en los tres municipios se implementan una serie de agrupaciones principales, entre ellos se encuentran los Carbamatos, Organofosforados y Clorados.

En el Figura 5 se ilustra el comportamiento de las familias en las tres jurisdicciones, siendo que en los municipios de Aquitania y Ventaquemada se observa que la familia más recurrente son los carbamatos obteniendo un valor del 75% y 73% respectivamente, siguiendo por la familia de Organofosforados, obteniendo valores de 15% para Aquitania y 20% para Ventaquemada, por último, se encuentra la familia de Clorados correspondiendo un valor de 10% para el municipio de Aquitania y un 7% para el municipio de Ventaquemada, Sin embargo, en el municipio de Moniquirá, prevalece el uso de la familia de sustancias cloradas con un valor del 45%, siguiendo la familia de los fosfoaminoácidos con un valor de 26%, luego encontramos la presencia de la familia de Carbamatos y organofosforados, con valores de 21% y 8% respectivamente, según el Convenio de Rotterdam, el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) & la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), determino que desde el 2010 los componentes activos como el Propineb (Fungicida), Mancozeb (Fungicida), y Carbofuran (Insecticida) son los más vendidos en el territorio nacional (Convenio de

Rotterdam et al., 2014), siendo que dichos componentes activos referenciados anteriormente pertenecen a la familia de los carbamatos.

Figura 5, Familia de Agroquímicos utilizados por la muestra



3.5 Coeficiente Alpha de Cronbach

Los datos recolectados en campo obtuvieron una consistencia interna aceptable, ya que el Coeficiente Alpha de Cronbach se mantuvo en el rango aprobado para el cumplimiento del tipo de estudio, como se observa en la Tabla 9, este parámetro tuvo un resultado de 0.791, significando que las variables tienen una homogeneidad buena, aumentando considerablemente la validez del estudio, volviendo confiable la información suministrada en el documento.

Tabla 9, Resultado del Coeficiente Alpha de Cronbach

VARIABLES		COEFICIENTE DE CRONBACH
V1: Tiempo de Exposición	V3: Edad de la Muestra	0.791
V2: Frecuencia de Fumigación	V4: Síntomas de la Muestra	
V5: Uso de los Elementos de Protección Personal		

3.6 Identificación y Clasificación de Variables

El Coeficiente Alpha de Cronbach influyo en la elección de variables, por lo que este método es apoyado en las correlaciones que tienen la información recolectada, en total se tendrá en cuenta cinco (5) variables para determinar la relación de salud de los agricultores y el uso de agroquímicos elaborados a base de carbamatos; en la Tabla 10 se observa la clasificación de las variables a trabajar, determinando el tipo de variable, escala de medición, tipo de análisis y la dependicidad que tiene cada una.

Tabla 10, Clasificación de las variables a trabajar

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	ESCALA DE MEDICION	DEPENDENCIA
Tiempo de Exposición	Cuantitativa	De Razón	Independiente
Frecuencia de Fumigación	Cuantitativa	De Razón	Independiente
Edad de la Muestra	Cuantitativa	De Razón	Independiente
Uso de EPP	Cualitativa	Nominal	Independiente
Síntomas de la Muestra	Cualitativa	Nominal	Dependiente

De las variables seleccionadas para el desarrollo del presente documento, se obtienen tres (3) variables que comprenden propiedades cuantitativas, en consecuencia, de que los datos recolectados son expresados en número, además el total de estas variables obtienen una escala de medición de razón, en vista de que tiene como referencia y punto de partida el cero (0) de los reales, por lo tanto, si se obtiene este valor indica ausencia

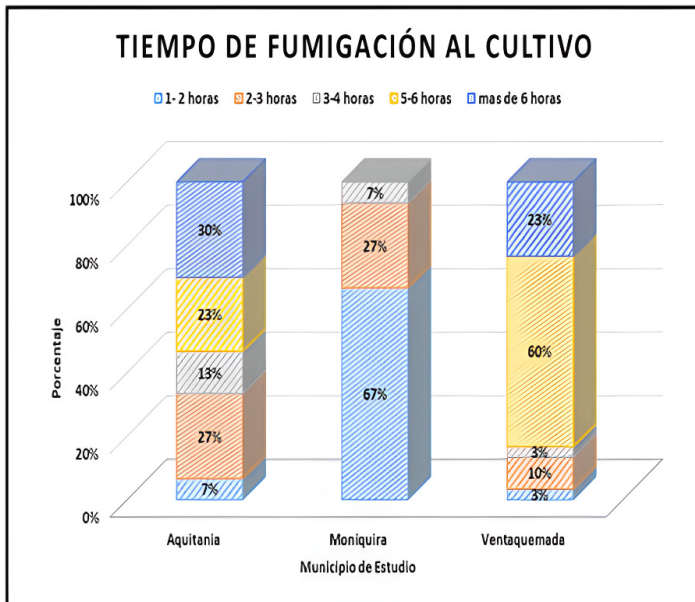
de la variable. (Velasco & Velasco, 2007), adicionalmente, se clasificaron dos (2) variables como cualitativas, siendo los datos recolectados categorías o modalidades de los individuos (datos no numéricos). Se determinó que la escala de medición para este tipo de variables es de estilo nominal, ya que no se puede definir un orden secuencial entre las categorías. (Bioestadística, 2010). En cuanto a la dependencia de las variables, según Velasco & Velasco las variables dependientes o también denominadas variables a explicar, son aquellas en las cuales, que se busca el motivo o la razón de su comportamiento, mientras que, las variables independientes o explicativas, son aquellas que influyen sobre la variable dependiente por medio de asociaciones directas (Velasco & Velasco, 2007), confirmando lo anterior, según Bejarano en el 2012 asegura que los efectos de salud son variables dependientes, es por ello que se denomina la variable referente a los síntomas de la muestra como dependiente y las cinco (5) variables restantes como independientes. (Bejarano, 2012)

3.6.1 Tiempo de Exposición

En el Figura 6 se ilustra la caracterización de la muestra de modo porcentual, basado en el tiempo que se demora el sujeto encuestado realizando la fumigación al cultivo, del total de muestra recolectada en el municipio de Aquitania, el 30% tarda más de 6 horas fumigando el cultivo, el 27% tarda entre 2 a 4 horas, el 23% tarda entre 5 a 6 horas, el 13% tarda entre 3 a 4 horas, mientras que el 7% restante tarda entre 1 y 2 horas. En el municipio de Moniquirá, el 67% demora entre 1 a 2 horas la fumigación del cultivo, mientras que el 27% tarda entre 2 a 4 horas, por último, el 7% tarda entre 3 a 4 horas. Para el municipio de Ventaquemada el 60% de la muestra tarda entre 5 a 6 horas realizar estos procesos de saneamiento al cultivo, el 23% siguiente tarda más de 6 horas, mientras que el 17% restante en proporciones de 10%, 4% y 3% tardan de 2 a 3 horas, de 3 a 4 horas y de 1 a 2 horas respectivamente, los tiempos de

exposición en los municipios analizados varían significativamente según la extensión de los cultivos presentes. En Aquitania al poseer la producción de un monocultivo, la amplitud de los mismos puede variar desde varias hectáreas cultivadas, hasta un espacio reducido dentro de una casa o un jardín, de acuerdo a lo anterior se presentan tiempos de exposición variables entre 1 y 2 horas para espacios reducidos y más de 6 horas para extensiones considerables de siembras, Moniquirá al tener mayor variedad de cultivo se reduce la magnitud de producción específica, promoviendo la fumigación por tipo de cultivo y demorando entre 1 y 2 horas la fumigación por tipo de cultivo; Ventaquemada al tener como producto principal la papa posee tiempos de fumigación variables con una reincidencia en un tiempo de fumigación entre 5 y 6 horas en promedio para la aplicación de agroquímicos, se presentan extensiones considerables de cultivos.

Figura 6, Respuesta al tiempo de Fumigación al Cultivo

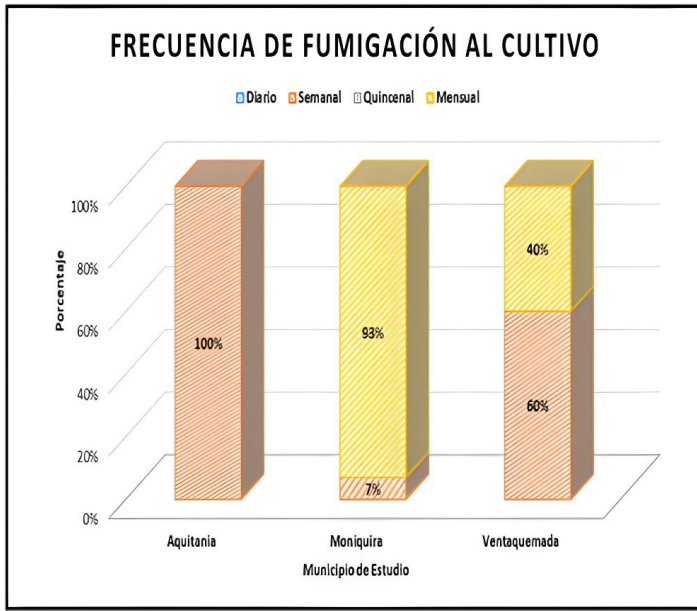


3.6.2 Frecuencia de Fumigación al Cultivo

En el Figura 7 se observa que en el municipio de Aquitania el 100% de la muestra recolectada realiza saneamiento a los cultivos con una periodicidad semanal, sin embargo, en el Municipio de Monquirá se encontró un comportamiento distinto, por lo que el 93% de la muestra recolectada realiza actividades sanitarias a cultivos de manera mensual y tan solo el 7% realiza las mismas actividades de manera semanal ; no obstante, en el municipio de Ventaquemada se reparte la relación 60% - 40% para semanal y mensual.

La frecuencia de fumigación de los cultivos está sujeta principalmente al tipo de cultivo implícito, la cantidad de humedad necesaria para su óptimo desarrollo y el clima, condiciones importantes para determinar las fumigaciones necesarias, adicionalmente, Aquitania en la siembra de cebolla de rama es propenso a ser atacado por plagas como hongos e insectos, los cuales pueden afectar en poco tiempo grandes extensiones del cultivos (Castellanos Castellanos, 2016); Monquirá por su variedad de productos ofertados y el clima que poseen, la proliferación de vectores que puedan interferir con un óptimo desarrollo en los cultivos es baja, de acuerdo a lo anterior se encuentran frecuencias de fumigación en su mayoría mensual; Ventaquemada maneja una aplicación de agroquímico según el cultivo lo necesite con el fin de minimizar el uso de productos químicos en la producción de acuerdo a esto la frecuencia de fumigación tiende a variar entre considerablemente entre fumigaciones mensuales y semanal.

Figura 7, Respuesta referente a la frecuencia con ue la muestra fumiga los cultivos



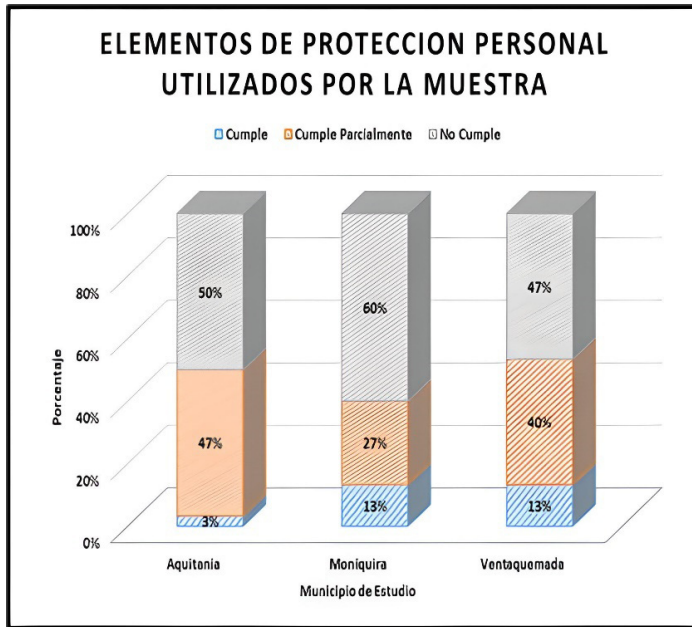
3.6.3 Elementos de Protección Personal (EPP)

Según la Organización Mundial de la Salud, expone que, para estar expuesto a un producto químico de uso agrícola, se debe tener en cuenta una serie de protecciones al cuerpo humano, sabiendo que la parte superior (Cabeza) es por donde se ingresa fácilmente las sustancias químicas, es por ello que la mayoría de elementos de protección personal están elaborado para este fragmento del cuerpo humano, los más comunes e importantes son lentes o gafas, tapabocas, guantes y botas. (Organization World Health, 2004)

Por medio del Figura 9, se observa un bajo uso de elementos de protección (EPP), detalladamente en Aquitania solo el 7% de la muestra cumple con el uso de todos los epp, siguiendo con el cumplimiento parcial obteniendo un valor de 47%, en este caso el trabajador le falta el uso del epp, mientras que el 50%

no cumple con el correcto uso de este tipo de protección; en Moniquirá se presenta el mismo comportamiento, teniendo el cumplimiento el menor valor porcentual (13%), seguido por el cumplimiento parcial (27%), siendo el restante (60%) la muestra que no cumple, con el correcto uso de epp, no obstante, **en el municipio de Ventaquemada se obtiene el menor porcentaje del no cumplimiento de epps por parte de los encuestados de los tres municipios, siendo el valor 47% para este parámetro, sin embargo, el cumplimiento toma un valor de 13% y el cumplimiento parcial de 40%.**

Figura 9, Respuesta al uso correcto de Elementos de Protección Personal



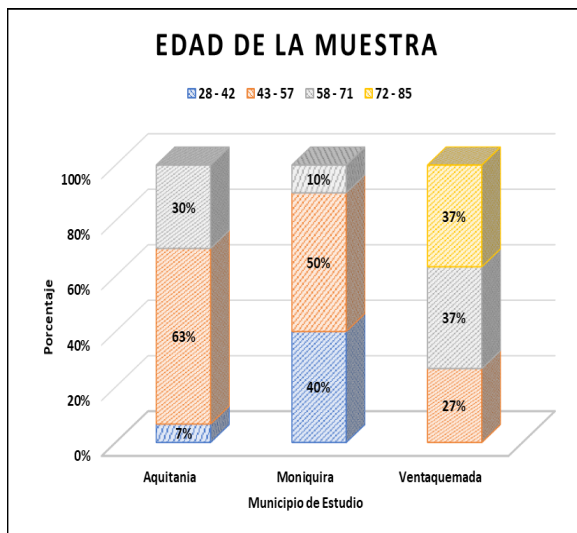
3.6.4 Edad de la Muestra

En los municipios de referencia se presenta una variación de edades, teniendo el individuo más joven de 28 años y el sujeto más veterano de 85 años, al igual, se obtiene un comportamiento definido en las tres zonas, observando que en el municipio de Aquitania y Ventaquemada se encuentra habitantes clasificados

como adultos y adultos mayores, mientras que en el municipio de Moniquirá se encuentra población clasificada como jóvenes y Adultos. (FAO, 2018)

Como se dijo anteriormente, en el municipio de Aquitania se encuentra que el 63% de la muestra recolectada en la zona se posicionan en el rango de edad entre los 43 a 57 años, siguiendo con un 30% individuos de edad entre 58 a 71 años, finalizando con tan solo 7% sujetos de edades entre 28 a 42; en el municipio de Moniquirá aumenta considerablemente el porcentaje correspondiente a las edades de 28 a 42 años, obteniendo un valor de 40% siguiendo con el rango más joven de edades correspondiendo a las edades comprendidas entre los 28 a 42 años con un valor de 40%, sin embargo, el 10% restante corresponde a sujetos de edades entre los 58 a 71 años; en el municipio de Ventaquemada se obtiene la población de mayor edad, ya que el porcentaje correspondiente a el rango de edad comprendido desde los 58 a los 71 años y desde los 72 a los 85 años obtiene un valor de 37% cada uno, a pesar de lo anterior, en la zona se encuentra un porcentaje de adultos de edades entre los 43 a 57 años siendo el 27% restante.

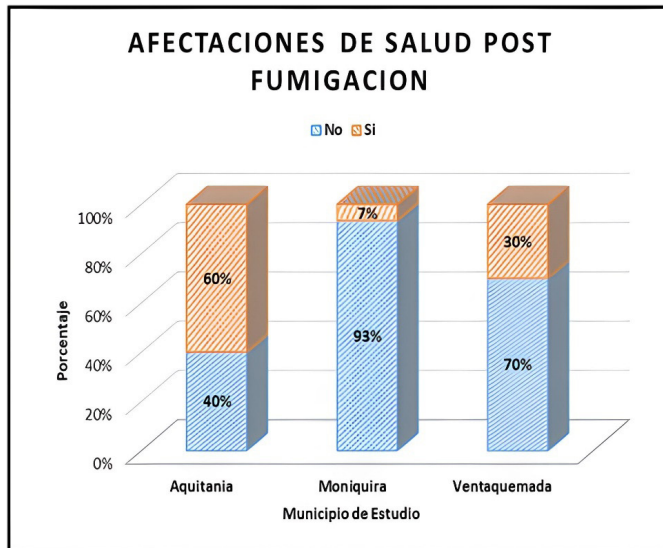
Figura 10, Edad de la Muestra



3.6.5 Afectaciones de Salud

Por medio de la depuración y procesamiento de la información recolectada en campo, se observa a grosso modo que gran parte de la muestra no presenta afectaciones de salud, no obstante, los que afirman presentar síntomas manifiestan sentirlos solo posterior a la fumigación, En el Figura 11, se observan los resultados obtenidos en los tres municipios para esta variable, donde se presenta una alta tasa de agricultores que presentan afectaciones de salud, siendo el municipio de Aquitania, la zona donde se obtiene el mayor valor porcentual correspondiente al 60%, seguido por el municipio de Ventaquemada con un valor de 30%, finalizando con Moniquirá donde se observa que el valor correspondiente a las afectaciones positivas de salud es mínimo (7%), por ende, los valores remanentes corresponden a la negación de presentar afectaciones de salud después de emplear pesticidas, siendo para Aquitania el 40%; Moniquirá el 93% y Ventaquemada el 70%, cabe resaltar que la muestra al momento de manifestar los diferentes síntomas, hacen aclaración que aparecían después de fumigar el cultivo.

Figura 11, Respuestas referente a síntomas o afectaciones de salud



3.6.6 Correlación de Variables (Método Rho de Spearman)

Se procesaron las correlaciones entre variables, como se observa en la Tabla 11 la mayoría de relaciones formadas, se posicionan en el rango de significado “Correlación Muy Fuerte”, siendo que los valores cumplen con la condición de ser mayor a 0.76 y menor a 0.90, de igual manera, se obtuvo “Correlaciones Considerables”, por lo que se observaron valores entre 0.51 a 0.75, cabe resaltar que en cada correlación ejecutada se evidencio un margen de error mínimo, por lo que los valores obtenidos en cada cruce se alejan de uno (1).

Tabla 11, Resultado de Correlaciones de Variables (Método Rho de Spearman)

CORRELACION DE VARIABLES					
Variables		Edad	Elementos de Protección Personal	Frecuencia de Fumigación	Tiempos de Fumigación
Afectación de Salud	Rho de Spearman	0,796**	-0,791**	0,860**	0,720*
	Sig (Bilateral)	0,000	0,000	0,000	0,003

En cuanto a la proporcionalidad de los comportamientos de datos, se obtuvo que la correlación entre las afectaciones de salud de la muestra y las variables como el uso de elementos de protección personal y el utilizar la dosificación correcta del pesticida son inversamente proporcionales, ya que el signo que acompaña el valor de la correlación es negativo, así mismo, se observan comportamientos con signo positivo, es decir, directamente proporcionales, siendo las correlaciones entre las afectaciones de salud de la muestra y variables como la edad de los individuos encuestados, frecuencia y tiempo de fumigación del cultivo.

3.6.6.1 Correlación entre Afectación de Salud y Edad de los individuos.

En la correlación realizada entre las variables de las afectaciones de salud de la muestra y la edad respectiva de cada individuo se obtuvo un valor de 0.796, determinando que la relación que tienen estas variables es directamente proporcional, lo cual, indica que entre mayor edad tenga el individuo que se ha expuesto a esta clase de sustancias químicas, mayor va ser el riesgo de sufrir afectaciones de salud o efectos secundarios por el uso de pesticidas.

Gráfico 12, Correlación entre Afectaciones de Salud y Edad de los Individuos



El Figura 12 hace alusión al cruce de las variables en referencia, logrando observar claramente el comportamiento de los datos, ya

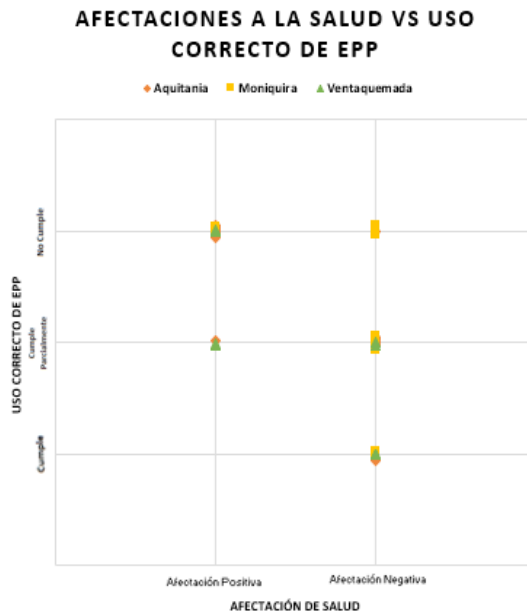
que, en el municipio de Aquitania se encontró una población más adulta, manifestando la mayoría el haber obtenido reacciones fisiológicas por estar expuesto a los agroquímicos utilizados en los cultivos de la zona, sin embargo, en el municipio de Monquirá se obtuvo un comportamiento opuesto, ya que, en esta zona se observa una población más joven, expresando no haber obtenido afectaciones de salud por el uso de productos químicos de uso agrícola, por otro lado, en el municipio de Ventaquemada no se evidencio un comportamiento definido, encontrándose una población adulta mayor que realiza oficios de agricultura en la zona, donde algunos individuos presentan problemas en salud por el uso de agroquímicos, sin embargo, algunos sujetos de la misma edad manifiestan no haber obtenido dichos problemas, en este caso la mayor parte de la población encuestada en este municipio no expresa haber tenido dificultades de salud por la implementación de estas sustancias químicas. Según la Organización Mundial de la Salud, la población que obtenga una vejez considerable confiere una vulnerabilidad alta, por lo que, una persona clasificada como adulto mayor tiende a desarrollar enfermedades específicas conocidas comúnmente como síndromes geriátricos, logrando ser afectados órganos importantes para la supervivencia de un ser humano, motivo principal del deterioro progresivo de sistemas vitales; como consecuencia se piensa que esta clase de población es frágil para desarrollar ciertas actividades laborales fuertes (Organization World Health, 2018).

3.6.6.2 Correlación entre Afectación de Salud y Uso de Elementos de Protección Personal (EPP).

En la correlación realizada entre las variables de las afectaciones de salud de la muestra y el uso de elementos de protección personal (EPP) de cada individuo se obtuvo un valor de 0.791, en el mismo sentido, se determina que la relación que tiene estas variables es inversamente proporcional, eso quiere expresar que, si el trabajador agrícola no usa todos los elementos de protección personal, aumenta el riesgo sufrir afectaciones de salud o efectos secundarios por el uso de pesticidas.

El Figura 13 contempla el comportamiento entre estas dos variables, observando que en el municipio de Aquitania, los individuos que utilizan correctamente los epp, no tienen afectaciones a la salud, de la misma manera, se observa que los sujetos que no realizan esta actividad correctamente son propensos a sufrir efectos secundarios, mientras que, en el municipio de Moniquirá, se observa un comportamiento distinto, en este caso, se observa que la mayoría de los individuos no cumplen con el uso de elementos de protección personal, sin embargo, en esta misma proporción los sujetos manifiestan no tener afectación alguna a la salud, mientras que en el municipio de Ventaquemada, aumenta la población que usa correctamente los elementos de protección personal, disminuyendo de manera veraz los individuos que expresan tener afectaciones de salud por el uso de agroquímicos.

Gráfico 13, Correlación entre Afectaciones de Salud y Uso de EPP

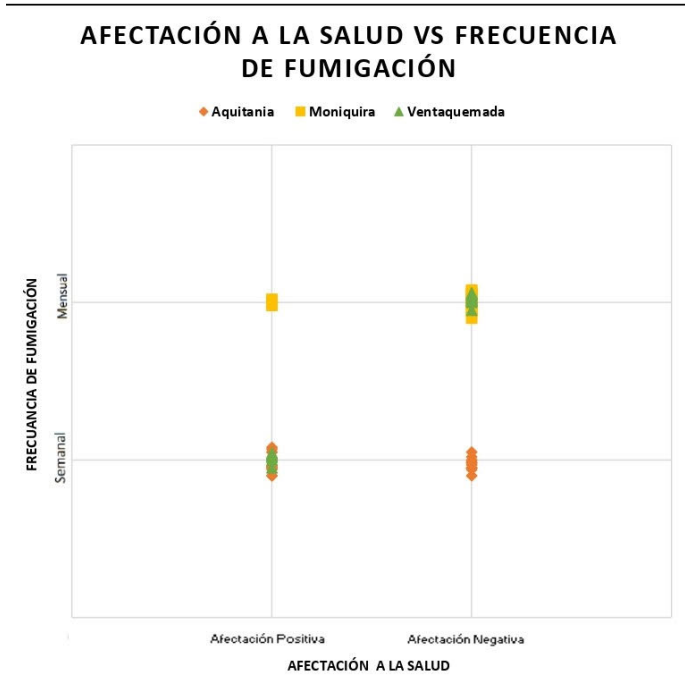


3.6.6.3 Correlación entre Afectación de Salud y Frecuencia de Fumigación.

En la correlación realizada entre las variables de las afectaciones de salud de la muestra y la frecuencia con que fumigan los cultivo se obtuvo el mayor valor entre las correlaciones siendo de 0.860, en cuanto a la proporcionalidad, se pudo determinar que la relación que tiene estas variables es directa, eso significa que si los agricultores realizan fumigaciones constantemente (Frecuencia alta) a las siembras de la zona, tienden a tener afectaciones de salud por intoxicaciones de sustancias químicas especializadas en el agro.

En el Figura 14, se observa el comportamiento de estas dos variables, donde la muestra tomada en el municipio de Aquitania informa realizar fumigaciones periódicas a los cultivos, siendo el municipio donde todos los individuos efectúan estas acciones sanitarias de una manera semanal, ahora bien, más del 50% de la muestra de esta jurisdicción afirma obtener afectaciones a la salud por manejos de agroquímicos, sin embargo, en el municipio de Moniquirá realizan controles sanitarios con pesticidas de manera mensual, obteniendo que más del 90% de la muestra moniquireña afirma no tener relaciones fisiológicas por el uso de estas sustancias químicas, por otro lado, en el municipio de Ventaquemada realizan fumigaciones con periodos semanales y mensuales, razón la cual un porcentaje pequeño de la muestra obtenida en este municipio tienen afectaciones de salud post – fumigación, siendo exactamente los individuos que realizan estas prácticas semanales, en concordancia a lo anterior, el restante de la muestra no manifestó afectaciones de salud teniendo en cuenta que realizan estas acciones agrícolas con frecuencia mensual.

Gráfico 14, Correlación entre Afectaciones de Salud y Frecuencia de Fumigación



según la Organización de Naciones Indígenas de Colombia, afirman que realizar procedimientos de aspersión aérea con sustancias químicas de uso agrícola generan intoxicaciones a la población, reportando síntomas como fiebre, vomito, diarrea, dolor de cabeza, afecciones de piel, mareos, irritaciones oculares entre otras. (ONIC, 2002)

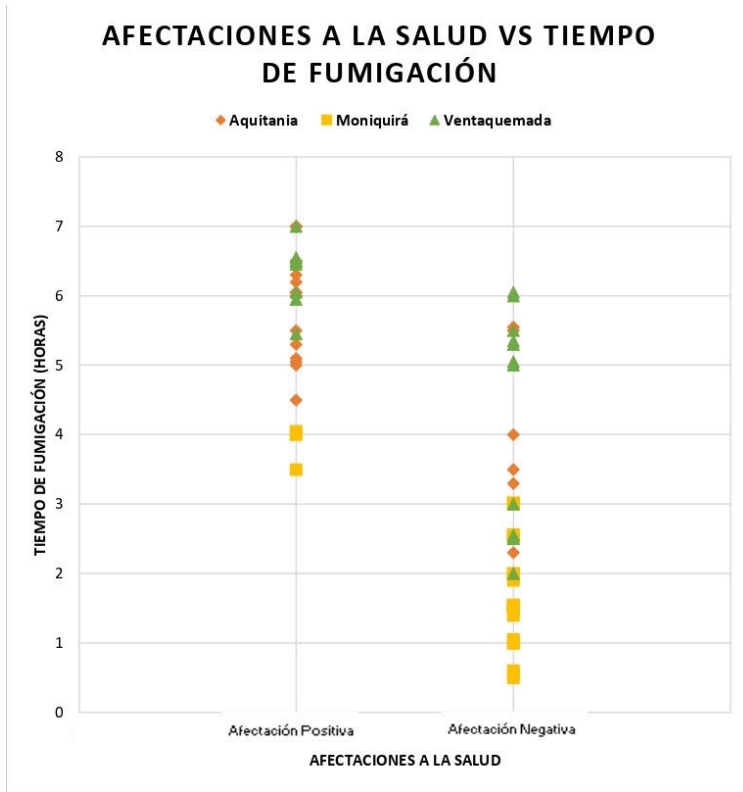
3.6.6.4 Correlación de Afectación de Salud y Tiempo de Fumigación.

En la correlación realizada entre las variables de las afectaciones de salud de la muestra y el tiempo de fumigación al cultivo se obtuvo un valor de 0.720, en cuanto a la proporcionalidad, se determina que la relación que tiene estas variables es directa,

eso significa que, los agricultores tienen una duración de tiempo extensa fumigando las siembras, tienden a tener afectaciones de salud por intoxicaciones de productos químicos de uso agrícola.

En el Figura 15 se logra observar un comportamiento evidente, logrando determinar que si los individuos se exponen a los agroquímicos empleados a los cultivos en un tiempo promedio de 4 a 5 horas se puede generar afectaciones a la salud a los sujetos, así mismo, se puede observar que un porcentaje considerable de individuos pertenecientes al municipio de Aquitania tienen afectaciones de salud, a causa de que dicha muestra tarda no menos de tres horas para realizar esta clase de acciones sanitarias, si lo comparamos con Moniquirá, se observa que es lo contrario a la zona anterior, teniendo la mayoría de la muestra recolectada sin afectaciones de salud, a condición de que estos agricultores no superan las cuatro horas de labores de fumigación, sin embargo, en el municipio de Ventaquemada se obtuvo un comportamiento diferente, ya que algunos individuos tienen una duración para realizar una dispersión aérea de sustancias químicas alta, superando las seis horas en el mismo hecho, registrando no haber tenido afectaciones de salud.

Gráfico 15, Correlación entre Afectaciones de Salud y Tiempos de Fumigación



Según Bejerano en el 2012, afirma que dependiendo el tiempo con que el trabajador agrícola este expuesto directamente a la sustancia química, puede verse afectada la salud del sujeto, al igual, esta variable es dinámica por lo que tiende a variar, siendo un subordinado a la ayuda que tenga el trabajador, el método con que implementa la aspersión aérea y el tamaño de la siembra. (Bejerano, 2012)

3.7 Determinación de Intoxicación de la muestra por Agroquímicos

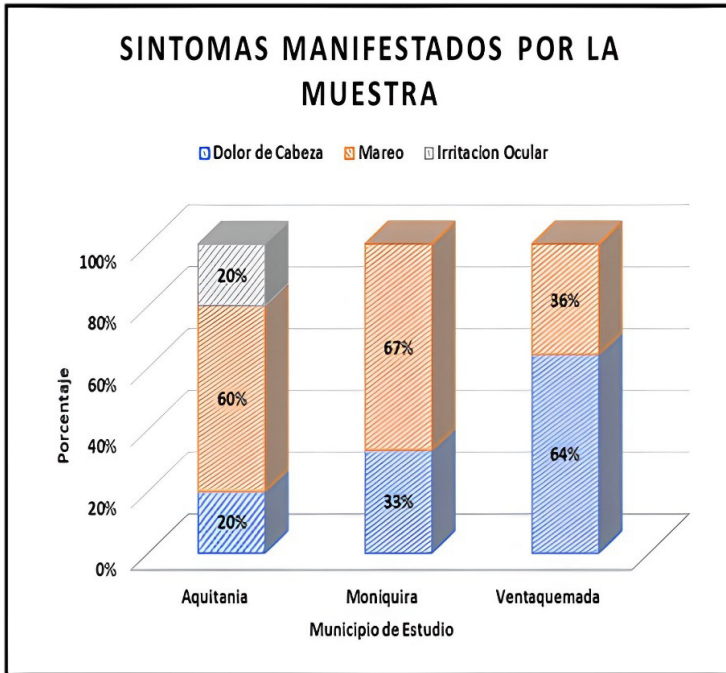
Para la determinación de intoxicación por exposición de productos químicos de uso agrícola se tomó en cuenta únicamente la muestra que manifestó obtener afectaciones de salud por medio de la aparición de síntomas.

3.7.1 Síntomas manifestados por la Muestra.

La vulnerabilidad que tiene un sujeto al realizar una determinada acción es normalizada, sin embargo, hay individuos que por su vocación se mantienen en contacto con una serie de elementos y sustancias que emplean con el fin de cumplir con sus actividades, en caso de la población agricultora por la exposición directa y continua a pesticidas son propensos a sufrir efectos negativos a la salud, siendo los más comunes el dolor de cabeza, náuseas, vómitos, trastornos de personalidad, dolores musculares, calambres, pérdida temporal de la vista, dolores estomacales y diarreas. (Bejarano, 2012)

Verificando lo anterior, se encontró en las tres zonas de estudio la aparición de síntomas como dolor de cabeza y mareo, adicionando que en el municipio de Aquitania una porción de muestra manifestó tener irritación ocular. Detalladamente se encontró que en el municipio de Aquitania el porcentaje para el síntoma de mareo fue de 60% siendo el síntoma más presentado, siguiendo por dolor de cabeza e irritación ocular cada uno con un valor de 20%, al igual, en el municipio de Moniquirá, se observó que el síntoma más recurrente es el mareo con un porcentaje de 67%, siendo el 33% restante para el dolor de cabeza, no obstante, en el municipio de Ventaquemada se encontró el patrón contrario de las zonas anteriores, ya que, el síntoma con mayor porcentaje de aparición fue el dolor de cabeza con un valor de 64%, mientras que el síntoma de mareo se presentó con el 36% restante.

Gráfico 17, Resultado de los Síntomas Manifestados por la Muestra



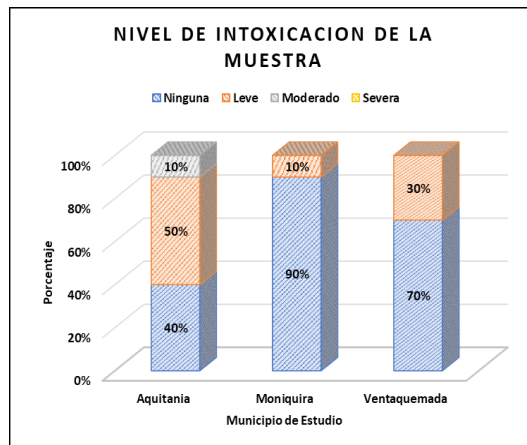
3.7.2 Nivel de Intoxicación de la Muestra

Relacionando la sintomatología encontrada en la población de muestra y la escala estandarizada Poisoning Severity Score (PSS) IPCS/EAPCCT se logró determinar el nivel de intoxicación que estaba sufriendo los individuos, aquí se tuvo en cuenta el total de la muestra recolectada en las zonas de interés, es por ello que se tuvo en cuenta cuatro (4) grados de intoxicaciones, siendo la primera nula (Ningún Síntoma), la segunda leve, la tercera moderada y por último la cuarta severa.

El Figura 18 se observan los resultados obtenidos de los niveles de intoxicación que sufre la muestra, en la zona de importancia se observa que el 40% de la muestra manifestó no tener síntomas después de emplear pesticidas, por ende, este porcentaje tiene

una intoxicación nula sin embargo, el 50% de los individuos de la misma zona se determinó que obtienen una intoxicación leve, mientras que el 10% remanente se establece que adquieren una intoxicación moderada, se realizó el mismo procedimiento para el municipio de Moniquirá obteniendo que el 90% de la muestra tiene intoxicaciones nulas, mientras que el 10% restante obtiene intoxicaciones leves, ahora bien, para el municipio de Ventaquemada se obtuvo que el 70% de la muestra no tiene ninguna intoxicación por estar expuesto a sustancias químicas de uso agrícola, no obstante, el 30% residual de la muestra obtiene una intoxicación leve.

Gráfico 18, Resultados del Nivel de Intoxicación de la Muestra



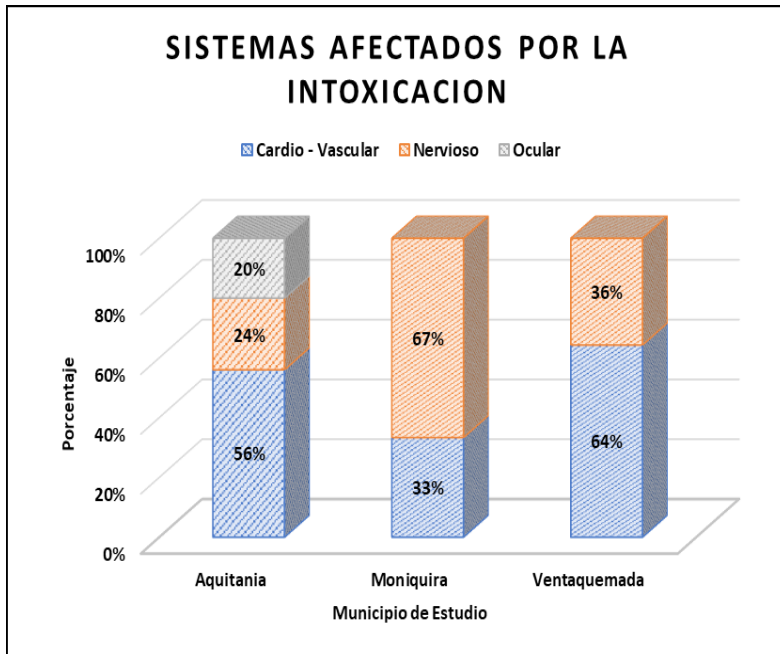
El proceso de detoxificación en cualquier ser viviente, varia observándolo desde el tiempo ya que depende del nivel de intoxicación que sufrió el cuerpo, dado que si se tiene una intoxicación moderada o severa las toxinas ingresadas al sistema tardaran más tiempo para ser expulsadas, logrando causar daños que no se observan si se obtuviera una intoxicación leve, en definitiva si se obtienen intoxicaciones con grados altos, pueden afectar al individuo pudiendo hasta causarle la muerte o por el contrario, dejar unas secuelas que dificulten la supervivencia del sujeto. (Fundación Eroski, 2013)

3.7.3 Principales Sistemas afectados por la Intoxicación

Los individuos al verse afectados por la intoxicación de sustancias químicas de uso agrícola, obtienen daños a sistemas del cuerpo humano indispensables para vivir, adicional, la tabla estandarizada Poisoning Severity Score (PSS) IPCS/EAPCCT logra determinar los sistemas afectados por la intoxicación causada, partiendo de los síntomas manifestados por los individuos.

En la Figura 19 se observan los resultados obtenidos de los sistemas afectados a la muestra por la intoxicación, partiendo que en Aquitania se observa que el principal sistema afectado es el cardiovascular obteniendo un porcentaje de 56%, siguiendo por el sistema nervioso con un 24% y por último el sistema ocular con un 20%, para el municipio de Moniquirá se obtuvo que el principal sistema afectado de la muestra es el nervioso con un 67%, siendo el 33% remanente para el sistema cardiovascular, al igual, para el municipio de Ventaquemada se obtuvo que el principal sistema afectado con productos químicos especializados en el agro es el cardiovascular con un porcentaje correspondiente a 64%, mientras que el segundo sistema afectado en la zona es el nervioso, con un valor en la muestra de 36%.

Gráfico 19, Resultado de los Sistemas afectados por la Intoxicación



La fisiología humana esta compuestas por una serie de sistemas vitales para el individuo, donde si llegase a fallar por distintas causas, se podrían tener consecuencias graves para el sujeto, los sistemas que son catalogados como frágiles son el nervioso, cardiovascular e inmunológico, comenzando por el primer sistema “funciona por medio de impulsos nerviosos voluntarios a los músculos del esqueleto y la piel”, está conformado por órganos como el cerebro y la espina dorsal; las consecuencias de la falla del sistema nervioso en el ser humano, puede generar ataques epilépticos, Parkinson, parálisis cerebrales o esclerosis múltiples, por otro lado, las secuelas que deja la deficiencia de este sistema son graves, por lo que, el sujeto tiende a realizar movimientos involuntarios con poca agilidad y precisión. (Flores, 2017)

El sistema cardiovascular es otro de los sistemas precario de sufrir afectaciones por intoxicaciones de sustancias químicas de uso agrícola, funciona “por medio del transporte de sangre logrando suministrar a los órganos y tejidos oxígeno”, está compuesto por el corazón y vasos sanguíneos; las consecuencias que puede tener la afectación de este sistema es la dinamicidad de la presión sanguínea, infartos, fiebre reumática entre otros, así mismo, la secuela más concurrida que pueda obtener un individuo al momento de que llegase a fallar este sistema es la aparición de trastornos de tensión arterial alta (Hipertensión). (Flores, 2017).

4. Conclusiones

El departamento de Boyacá al ser una zona impulsada por una economía basada en la agricultura, requiere un mayor control y seguimiento por parte de las Autoridades Nacionales Competentes (ANC) agropecuarias, ya que, gracias al trabajo de campo se logró identificar las falencias en el manejo de agroquímicos por desconocimiento de los individuos y falta de capacitación, acompañado de la falta de interés por reconocer los riesgos a los que se encuentran expuestos en el manejo de éste tipo de sustancias. Del mismo modo, se requiere de la aplicación de campañas de concientización que permitan divulgar la información más relevante en el uso y manejo de sustancias químicas desde los fabricantes y empresas distribuidoras incluyendo los pequeños almacenes municipales. Al evaluar el nivel de riesgo del agricultor que emplea estos químicos agrícolas, se puede concluir que en el municipio de Aquitania tienen mayor riesgo de adquirir enfermedades o síntomas causados por el mal uso de pesticidas.

El estudio permitió identificar anomalías en la cadena de producción y distribución de agroquímicos, observando que la mayoría de los que fueron mencionados por los individuos encuestados se encuentran en estado cancelado o reevaluado, pasando por alto la normatividad vigente. Tomando como base la clasificación de variables se logran observar los posibles errores o fallas que pueden cometer los individuos al momento de implementar productos químicos especializados en el agro, aumentando el riesgo y vulnerabilidad de la población con vocación agrícola, obteniendo como consecuencia la generación de enfermedades o síntomas que afectan directamente la salud de estos. De este modo, variables como la frecuencia de fumigación y la edad del agricultor maximizan los impactos en la salud de los individuos.

Otras variables que coadyuvan a la afectación en la salud de los agricultores, son el uso de elementos de protección personal, donde se destaca que la mayoría de encuestados no están cumpliendo con lo exigido por las recomendaciones emitidas por las ANC, Organizaciones internacionales o fabricantes de PQUA, lo cual se atribuye a la cultura y accesibilidad económica que tienen los agricultores sobre los elementos de protección personal (EPP), estando de acuerdo con García et.al afirmado en el 2002, donde asegura que la situación económica de la población agricultora es precaria, limitando el mantenimiento de los cultivos y el refuerzo a la protección del trabajador (García et al., 2002). El tiempo de exposición es otra de las variable que ejerce preocupación, puesto que los largos periodos de tiempo en que los agricultores son expuestos a las sustancias químicas que son empleadas en los cultivos, no tienen ningún control, confirmando lo propuesto por Lesmes – Fabian & R. Binder en el 2012, asegurando que el tiempo y el tipo de producto agrícola empleado hace variar el riesgo del trabajador agrícola, hasta llegar el punto de lograr la adquisición de alguna enfermedad por ingesta de la sustancia de manera inconsciente (Lesmes Fabian & R. Binder, 2012).

Partiendo de Muños & Ávila quienes afirman que existe una relación entre los síntomas manifestados por los agricultores y el uso de pesticidas elaborados a base de carbamatos (Muñoz Piña & Ávila Forcada, 2018), se puede concluir que la sustancia química empleada en el cultivo está ingresando inconscientemente al cuerpo de los sujetos principalmente por vías respiratorias y oculares, a explicación tenemos que, se revelan estas ingestas por medio de manifestaciones de fallas de algunos órganos en el cuerpo, siendo dolores de cabeza, mareos y pérdida parcial de vista o irritaciones oculares. Por esto, se infiere que el uso de tales químicos indispensables para los cultivos, están causando intoxicaciones leves y en ocasiones moderadas para los trabajadores y habitantes de la zona de estudio, fundamentado en un evidente deterioro de los sistemas vitales para el cuerpo humano, siendo principalmente los sistemas cardiovascular y nervioso los más propensos a estropear el buen funcionamiento de la fisiología humana.

5. Referencias

- Aguilar-Barojas, S. (2005). Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud. *Salud En Tabasco*, 2–7. <https://doi.org/ISSN:1405-2091>
- Alcaldía de Ventaquemada. (2016). *Diagnóstico para la formulación del Plan de Desarrollo Municipal de Ventaquemada - Boyacá*. 6–16. https://ventaquemadaboyaca.micolombiadigital.gov.co/sites/ventaquemadaboyaca/content/files/000043/2149_plandedesarrollo20162019entretodossipodemos_2.pdf
- Alcaldía Municipal de Aquitania. (2016). *Plan de Desarrollo del Municipio de Aquitania (Boyaca)*. 246. <http://www.aquitania-boyaca.gov.co/programas/plan-de-desarrollo-20162019>

- Alcaldía Municipal de Moniquirá. (2016). *Plan de desarrollo Moniquira*. www.moniquira-boyaca.gov.co
- Arias Gómez, H. Y., & Antosová, G. (2015). Perfil espacial de la economía boyacense. *Apuntes Del Cenes*, 34(59), 93. <https://doi.org/10.19053/22565779.3538>
- Bartual, J., & Berenguer, J. (1983). NTP 143: Pesticidas: clasificación y riesgos principales. *Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España*, 4. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_143.pdf
- Bedmar, F. (2006). Informe especial plaguicidas agrícolas. *The Journal of Agricultural Science*, 21(doi:10.1017/S0021859605005708.), 144, pp 31-43. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859605005708>
- Bejarano, J. (2012). *Guía Para la Gestión Ambiental Responsable de los Plaguicidas Químicos de Uso Agrícola en Colombia. Librería Digital*, 225.
- Bioestadística. (2010). *Capítulo 2. Análisis de Datos Cualitativos*. 17–23.
- Castellanos Castellanos, P. A. (2016). Manejo Integrado del Cultivo de Cebolla de Rama para el Departamento de Risaralda. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Cid, R. (2014). Capítulo 2 Plaguicidas químicos, composición y formulaciones, etiquetado, clasificación toxicológica, residuos y métodos de aplicación. *Aplicación Eficiente de Fitosanitarios*, 1–14. <http://inta.gob.ar/documentos/aplicacion-eficiente-de-fitosanitarios.-plaguicidas-quimicos-composicion-y-formulaciones-etiquetado-clasificacion-toxicologica-residuos-y-metodologias-de-aplicacion>
- Convenio de Rotterdam, Instituto Colombiano Agropecuario, & FAO. (2014). *Evaluación De Intoxicaciones Ocupacionales Por*

- Exposición a Formulaciones De Plaguicidas Con Ingrediente Activo Carbofuran, Procedentes De Los Departamentos De Meta, Valle, Norte De Santander, Tolima, Antioquia, Quindío, Huila, Caldas, Risaralda Y Cundina.* http://www.who.int/ipcs/publications/pesticides_hazard_2009.pdf
- Cozby, P.C. (2018). Métodos de Investigación del Comportamiento. In *تفتیق: فنون* (McGraw Hill, Issue *تفتیق*)
- FAO. (2018). *Colombia Nota de Análisis Sectorial Colombia Colombia*. 68. <http://www.fao.org/3/a-ak167s.pdf>
- Flores, C. (2017). Los Sistemas del Cuerpo Humano Los sistemas del cuerpo humano. *Revista Médica de La Universidad Veracruzana*, 23(6), 1–3. http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_hum/psico_salud/cap/02.pdf
- Frías-Navarro, D. (2019). Un Instrumento De Medida. *Universidad de Valencia*, 1–13. <https://www.uv.es/friasnav/AlfaCronbach.pdf>
- Fundación Eroski. (2013). *Sistema Inmunitario y Mecanismos de Detoxificación*.
- Gallardo de Parada, Y., & Moreno Garzón, A. (1999). Aprender a investigar. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53, Issue 9). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- García, A., Ramírez, A., & Lacasaña, M. (2002). Prácticas de utilización de plaguicidas en agricultores. *Gaceta Sanitaria*, 16, 236–240. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0213-9111\(02\)71667-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0213-9111(02)71667-1)
- GOBERNACIÓN DE BOYACÁ, S. D. A. (2019). Plan Departamental De Extensión Agropecuaria - Pdea. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Gobierno Nacional de Colombia. (2019). Plan Nacional de Seguridad Alimentaria y Nutricional. *Ministerio de*

Agricultura y Desarrollo Rural, 68.

Greenpeace. (2015). Pesticide Spraying in Tea Estate in Kerala/ India. *Pesticides and Our Health-a Growing Concern*, May, 1–56.

Instituto Colombiano Agropecuario. (2003). *RESOLUCIÓN No . 03759 Por la cual se dictan disposiciones sobre el Registro y Control de los Plaguicidas Químicos de uso Agrícola Por la cual se dictan disposiciones sobre el Registro y Control de los Plaguicidas Químicos de uso Agrícola. 03759(03759)*, 1–23.

Instituto Colombiano Agropecuario. (2018). *Manual para la Elaboración de Protocolos para Ensayos de Eficacia con PQUA*.

Instituto Colombiano de Normas Técnica y Certificación. (2010). GTC-45: Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional. *Icontec*, 571, 1–38.

Jiménez Quintero, C. A., Pantoja Estrada, A. H., & Leonel, H. F. (2016). Riesgos en la salud de agricultores por uso y manejo de plaguicidas, microcuenca “La Pila.” *Universidad y Salud*, 18(3), 417. <https://doi.org/10.22267/rus.161803.48>

Lesmes Fabian, C., & R. Binder, C. (2012). Dermal and Inhalation Exposure Assessment of Pesticide Management in Greenhouse Flower Crops in Colombia Management in Greenhouse Flower Crops in Colombia. *Conference Paper*, April.

MAG. (1991). Cultivo de la caña. *Aspectos Técnicos Sobre Cuarentena y Cinco Cultivos Agrícolas de Costa Rica.*, 178. <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/tec-cana.pdf>

Manzur, J., Bustos, E., Carbone, A., de Titto, E., Benítez, R., & Digón, A. (2015). *Plaguicidas_salud_del_trabajador*.

Mejía, G., & Castellanos, A. (2018). Costos de producción y rentabilidad del cultivo de la papa en Zacapoaxtla , Puebla Resumen Introducción. *Revista Mexicana de Ciencias*

Agrícolas, 9(Noviembre), 1651–1661.

- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural Gobierno de Colombia. (2009). Mis Buenas Prácticas Agrícolas “Guía para agroempresarios.” In *Cartilla BPA*. <http://www.ica.gov.co/Areas/Agricola/Servicios/Inocuidad-Agricola/Capacitacion/cartillaBPA.aspx>
- Ministerio de la Salud y la Protección Social. (2014). *para la construcción del ASIS de las Entidades Territoriales*. 146.
- Mondragon, M. (2000). Uso de la correlación de Spearman en un estudio de intervención en fisioterapia. *Movimiento Científico*, ISSN-e 2011-7191, Vol. 8, N°. 1, 2014, Págs. 98-104, 8(1), 98–104. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5156978>
- Muñoz Piña, C., & Ávila Forcada, S. (2018). Los efectos de un impuesto ambiental a los plaguicidas en México. *Instituto Nacional de Ecología*, 43–53.
- ONIC. (2002). *Evaluación de las Fumigaciones En Colombia*.
- Ordoñez, G. (2010). Salud ambiental: conceptos y actividades. Informe Especial. *Rev Panam Salud Publica* *Pravana Salud Pública*, 7 (3)(3), 137–147. <https://www.scielosp.org/pdf/rpsp/v7n3/1404.pdf>
- Organization World Health. (2004). Prevención de los riesgos para la salud derivados del uso de plaguicidas en la agricultura. *Proteccion Para La Salud de Los Trabajadores*, 6–35. http://www.who.int/occupational_health/publications/es/pwh1sp.pdf
- Organization World Health. (2010). *The WHO Recommended Classification of Pesticides by Hazard*.
- Organization World Health. (2017). *Herramienta De Evaluación De Riesgos Para La Salud Humana De La Oms: Peligros Químicos*.
- Organization World Health. (2018). Informe Mundial Sobre el

Envejecimiento a la Salud. *Biblioteca de La OMS*, 978 92 4 356504 0, 282.

Ortega, M. (2009). Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180414044017>. *Revista Habanera de Ciencias Médicas.*, 8.

Pacheco, B., Gonzalez, J., Visaus, F., & Ayla, K. (2012). Movilidad de pesticidas en aguas superficiales empleadas en agricultura y riesgos para la salud humana en la zona centro del Departamento de Boyacá - Colombia. *L'esprit Ingénieux*, 3, 155–165. <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/lingenieux/article/view/132>

Paredes, L. (2009). *Las Variables de la Investigación*. 1, 81–96. http://biblio3.url.edu.gt/publiclg/biblio_sin_paredes/fac_politicas/2018/tecnico_trab/inici_pracinves/cont/06.pdf

Persson, H., Sjöberg, G., Haines, J., & Pronczuk de Garbino, J. (2018). Poisoning Severity Score (Pss) Ipcs / Eapcct. *Clinical Toxicology*, 36, 205–213.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD. (2011). *Razones para la esperanza Resumen ejecutivo*. http://viva.org.co/cajavirtual/svc0276/pdfs/articulo593_276.pdf

Quero Virla, M. (2010). Confiabilidad y Coeficiente Alpha de Cronbach. *Revista de Estudios Interdisciplinarios En Ciencias Sociales*, 12 (2), 248–252. <https://doi.org/10.1109/igarss.2004.1370608>

Russi-Diaz, A. (2017). MEDIOS DE VIDA DERIVADOS DE LA PREDOMINANCIA DEL CULTIVO DE CEBOLLA DE RAMA *Allium Fistulosum* L. EN EL PAISAJE SOCIOECOLÓGICO DE PRODUCCIÓN EN AQUITANIA (BOYACÁ). *Pontifica Universidad Javeriana*, 117.

Secretaria de Salud de Boyacá. (2019). Analisis de Situacion de Salud (ASIS) Aquitania. *Gobernación de Boyacá*.

Secretaría General, C. A. (2019). *Resolución N° 2075 - Manual Técnico Andino para el Registro y Control de PQUA*.

- SPSS Inc. (2010). *Guía breve de IBM SPSS Statistics*. 102. https://www.unileon.es/ficheros/servicios/informatica/spss/spanish/IBM-SPSS_guia_breve.pdf
- Velasco, A. C., & Velasco, M. de los A. (2007). Lo cuantitativo y cualitativo en la investigación . Un apoyo a su enseñanza. *Revista Iberoamericana Para La Investigación y El Desarrollo Educativo*, 7, 22.



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS
TUNJA

VIGILADA MINEDUCACIÓN - SNIES 1732



Avances en Ingeniería

y su aporte a la Sostenibilidad