

Abejas *Apis mellifera* como indicadores de material particulado en el aire

Edison Esteban Gallego Quintero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Medellín

2020

***Abejas Apis mellifera* como indicadores de material particulado en el aire**

Edison Esteban Gallego Quintero

Trabajo para optar al título de Ingeniero Ambiental

Director:

Quím. MSc PhD Gloria María Doria Herrera

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Programa de Ingeniería Ambiental

Medellín

2020

Página de Aceptación

Quím. MSc PhD Gloria María Doria Herrera

Director Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Dedicatoria

A todas las personas que hacen parte de mi vida y aportaron conocimiento y experiencia en el recorrido de este camino.

Agradecimientos

A la universidad, por permitirme acceder a la educación desde la distancia y a la ingeniera

Ángela Arango por creer mí. ¡Gratitud por siempre!

Resumen

Las abejas *Apis mellifera*, son insectos altamente sensibles a los cambios ambientales debido a sus características fisiológicas tales como poseer un cuerpo velludo que les facilita la captura de sustancias volátiles y su hábito de volar alrededor de la colmena a diferentes alturas y velocidades donde interactúan con el aire, el suelo, el agua y la flora, permiten que esta especie se convierta en una herramienta para el análisis de la contaminación atmosférica, teniendo en cuenta que en la actualidad no existe un estudio que recopile estos hallazgos. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación fue reunir datos relacionados con el potencial de las abejas como bioindicadores ambientales dado su alta capacidad para capturar, transportar, transformar en sus productos, bioacumular y presentar alteraciones morfológicas como consecuencia de la exposición a elevados niveles de contaminación atmosférica. Para lograr este objetivo se realizaron revisiones bibliográficas, haciendo uso de herramientas bibliométricas como criterios de búsqueda en bases de datos, establecimiento de criterios de inclusión/exclusión, aplicación de rúbricas de puntuación, establecimiento de la ecuación bibliométrica y finalmente, la recopilación de los principales hallazgos encontrados permitieron definir que se deben considerar las siguientes variables para afirmar que existe contaminación en el aire por presencia de material particulado: muerte súbita de las abejas, presencia de metales pesados en el cuerpo de la abeja y en los subproductos, con valores por encima de los umbrales reportados y asimetría en las alas. Finalmente, como importante resultado de la investigación, se propone una ecuación para sintetizar las características que se deben cumplir para que el monitoreo sea representativo y se concluye que si es posible determinar la presencia y composición del material particulado en el aire haciendo uso de abejas *Apis mellifera* como bioindicador.

Palabras claves: *Apis mellifera*, indicador ambiental, contaminación atmosférica, material particulado.

Abstract

Apis mellifera bees are highly sensitive insects to environmental changes due to their physiological characteristics such as possessing a hairy body that facilitates them to capture volatile substances and their habit of flying around the hive at different heights and speeds where they interact with air, soil, water and flora, allow this species to become a tool for the analysis of air pollution, taking into account that there is currently no study that collects these findings. Therefore, the objective of this research was to gather data related to the potential of bees as environmental bioindicators given their high capacity to capture, transport, transform into their products, bioaccumulate and present morphological alterations because of exposure to high levels of air pollution. To achieve this objective, bibliographic reviews were carried out, using bibliometric tools such as database search criteria, establishment of inclusion/exclusion criteria, application of punctuation rubrics, establishment of the bibliometric equation and finally, the collection of the main findings found allowed to define that the following variables should be considered to affirm that there is air pollution due to the presence of particulate matter: sudden death of bees, presence of heavy metals in the bee body and in by-products, with values above the reported thresholds and asymmetry in the wings. Finally, as an important result of the research, an equation is proposed to synthesize the characteristics that must be fulfilled for the monitoring to be representative and it is concluded that if it is possible to determine the presence and composition of particulate matter in the air using *Apis mellifera* bees as a bioindicator.

Keywords: *Apis mellifera*, environmental indicator, air pollution, particulate matter.

Tabla de contenido

Lista de tablas.....	10
Lista de figuras.....	11
Introducción.....	12
Problema.....	14
Descripción del problema.....	14
Planteamiento del problema.....	15
Sistematización del Problema.....	16
Justificación.....	17
Objetivos.....	19
Objetivo general.....	19
Objetivos específicos.....	19
Marco de referencia.....	20
El aire y su composición.....	20
Contaminación del aire.....	20
El material particulado.....	21
Bioindicadores naturales.....	21
Abejas como bioindicadores.....	22
Metodología.....	24
Definición de ruta metodológica.....	24
Definición de palabras clave.....	24
Búsqueda bibliográfica en bases de datos.....	25
Selección de artículos científicos.....	26
Resultados y discusión.....	30

Resultados de la búsqueda bibliográfica	30
Resultados de la selección y clasificación de artículos	32
Estudios de abejas <i>Apis mellifera</i> como bioindicadores en el mundo	34
Características fisiológicas y comportamentales de la especie que la clasifican como bioindicadora.....	37
Variables que influyen de manera significativa en las estrategias de monitoreo.....	40
Muerte súbita de las abejas.....	40
Presencia de metales pesados en el cuerpo de la abeja	42
Presencia de contaminantes en los subproductos	45
Asimetría en las alas.....	47
La abeja <i>Apis mellifera</i> como bioindicador de material particulado en el aire	48
Conclusiones	50
Referencias bibliográficas	51
Recomendaciones.....	63

Lista de tablas

Tabla 1. Rubrica de puntuación basado en metodología PRISMA27

Tabla 2. Interpretación de los resultados de la ecuación propuesta49

Lista de figuras

Figura 1. Ruta metodológica para la revisión de artículos usados en la investigación	24
Figura 2. Resultados obtenidos por base de datos.....	30
Figura 3. Resultados obtenidos por combinación de palabras clave.....	32
Figura 4. Selección de artículos	33
Figura 5. Resultados de la aplicación de la rúbrica de puntuación	34
Figura 6. Países donde se registran investigaciones de abejas <i>Apis mellifera</i> como bioindicadores	35

Introducción

Las emisiones de material particulado al aire han aumentado en los últimos años como resultado del uso de combustibles fósiles y el desarrollo de actividades antrópicas. En consecuencia, causa afectación a los ecosistemas y problemas de salud en poblaciones sensibles (Varón & Ruiz, 2017). En Colombia, se realiza monitoreo de la calidad del aire en las principales ciudades con estaciones fisicoquímicas, sin embargo, no se conocen estaciones de monitoreo usando bioindicadores ambientales que son aquellas especies que por sus características y sensibilidad a las perturbaciones ambientales se pueden usar para medir el grado de afectación a los ecosistemas (Zuarth et al., 2014).

Por otro lado, la *Apis mellifera* puede ser considerado un bioindicador de material particulado en el aire, ya que diversos estudios han confirmado que son insectos que poseen alta sensibilidad a los cambios ambientales y fácilmente pueden transportar, almacenar en sus productos, bioacumular y presentar alteraciones morfológicas como resultado de la contaminación ambiental (Pellecchia & Negri, 2018). La característica principal es su hábito de vuelo durante el día en el proceso de recolección de polen y néctar a diferentes velocidades y alturas, así como también, sus características morfológicas, especialmente los pelos o vellosidades que recubren su cuerpo y le permiten capturar las sustancias que entran en contacto con ellos, teniendo en cuenta que visitan la vegetación, el suelo, el agua y el aire (Gorza, 2007).

La investigación de esta problemática se realizó por el interés de recopilar investigaciones en otros países para conocer los resultados y conclusiones de los procesos de biomonitoreo de algunos parámetros de calidad del aire, permitiendo identificar el potencial de las abejas para detectar perturbaciones en el aire y correlacionar los datos asociados a la presencia de material particulado en el aire. Por otra parte, establecer los principales elementos químicos que

componen el material particulado presente en las abejas o sus productos (miel, polen y propóleo) y que son identificados a través de las diversas técnicas de análisis en laboratorio, como, por ejemplo, asimetría fluctuante, espectrometría de emisión atómica y espectrofotometría de absorción atómica.

Esta indagación desde la perspectiva de las ciencias naturales presenta un componente de interés académico que tiene el potencial de convertirse en el desarrollo de un trabajo aplicado en las principales ciudades del país donde se monitorea la calidad del aire, y con la facilidad de correlacionar los datos con las demás estaciones tradicionales para detectar la influencia directa del material particulado o sus efectos en los seres vivos.

Problema

El aumento poblacional y el desarrollo industrial y tecnológico han traído asociados importantes fenómenos que tienen el potencial para alterar el estado del balance energético del planeta tierra y la capacidad para generar alteraciones en la salud de los seres humanos y cambiar los patrones de comportamiento de todos los ecosistemas (Silva, 2003). De igual forma, la mayoría de los seres vivos que habitan el planeta tierra son aerobios y la contaminación atmosférica representa una amenaza para la vida, el equilibrio del planeta y los ecosistemas porque a medida que aumentan las actividades antrópicas también aumenta la contaminación (Zaric et al., 2018). Desde el contexto histórico, en los últimos 40 años ha sido más crítico el deterioro de la calidad del aire “como resultado del desarrollo y agudización de múltiples desequilibrios de carácter económico, urbano, energético, social y ambiental” (Placeres et al., 2006).

Descripción del problema

Según datos del Instituto Nacional de Salud, (2019), en Colombia, se estima que “por exposición a aire y agua de mala calidad ocurren cada año 17.549 muertes, es decir el 8% del total de la mortalidad anual” y además se considera que la contaminación del aire “puede aumentar el riesgo de infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas, accidentes cerebrovasculares y cáncer de pulmón” (Organización Mundial de la Salud, 2018), afectando esencialmente a poblaciones sensibles (niños y ancianos) y siendo más grave el problema en grandes ciudades con sobrepoblación o ubicadas geográficamente en medio de cordilleras (valles) donde las corrientes de aire son lentas o recirculan y se dificulta la dispersión de contaminantes.

Dentro del grupo de los principales contaminantes del aire o contaminantes criterio, se encuentra el material particulado, el cual es nocivo para la salud de las personas y se le atribuyen

efectos como muertes prematuras en personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, infartos, irritación en vías respiratorias y afectaciones pulmonares (EPA, 2018).

Planteamiento del problema

Los métodos fisicoquímicos para evaluar la contaminación del aire utilizan modelos estadísticos y matemáticos para modelar la concentración y dispersión de los contaminantes, sin embargo, “no tienen en cuenta ningún efecto aditivo, sinérgico o antagónico” (I. Gutiérrez, 2015), que permita conocer la interacción del material particulado en el interior de los ecosistemas. Por lo tanto, el uso de abejas como bioindicadores permite analizar las verdaderas consecuencias de la contaminación sobre los seres vivos, teniendo en cuenta que estos insectos son organismos tolerantes a metales pesados los cuales pueden bioacumular en su cuerpo o sus productos, pero presentan alta sensibilidad a otro tipo de contaminantes como los plaguicidas (I. Gutiérrez, 2015).

Por su parte, estudios realizados en el territorio municipal de Córdoba, España, en zonas urbanas, industriales, agrarias y forestales, en el periodo comprendido entre los años 2007 y el 2010, donde se recogieron muestras de abejas pecoreadoras y néctar, encontraron presencia de Plomo, Cromo, Níquel y Cadmio, utilizando para el análisis técnicas de espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente y espectrofotometría de absorción atómica en horno de grafito (I. Gutiérrez, 2015), y además, estos resultados fueron correlacionados con los datos de las estaciones fisicoquímicas, encontrando que en la mayoría de los casos existió una relación directa entre la presencia y concentración de los contaminantes, confirmando el potencial bioindicador de las abejas.

La importancia de esta temática requiere compilaciones bibliográficas que permitan extraer síntesis de los estudios realizados alrededor del mundo y lo cual nos lleva a plantear la

siguiente pregunta de investigación: Según estudios reportados en la literatura, ¿Es posible establecer la presencia y composición del material particulado en el aire haciendo uso de las abejas *Apis mellifera* como bioindicador?

En vista de lo anterior y teniendo en cuenta los diversos estudios realizados, se puede establecer que las abejas *Apis mellifera* son bioindicadores que permiten analizar la presencia y composición del material particulado en el aire.

Sistematización del Problema

Para sintetizar esta problemática se requiere una búsqueda rigurosa en bases de datos y metabuscadores con el fin de coleccionar artículos científicos de alta calidad, los cuales deben ser analizados y filtrados aplicando criterios de calidad que permitan clasificar aquellos documentos que cumplen con el propósito de la investigación, teniendo en cuenta la posible relación entre las abejas y la contaminación del aire por material particulado.

Justificación

Globalmente la contaminación atmosférica representa una amenaza para la vida y la salud de los seres humanos, siendo el problema más crítico en las grandes ciudades donde hay aglomeración de personas y gran cantidad de vehículos que generan emisiones de material particulado y otros vapores contaminantes. Específicamente, el material particulado, es una mezcla de partículas muy diminutas que se encuentran suspendidas en el aire con una composición muy variada, dependiendo su origen pueden permanecer flotando y se pueden acumular o dispersar en el aire en relación con los vientos, la temperatura, geografía y eventos de precipitación, las cuales pueden ser emitidas por fuentes naturales como erupciones volcánicas y por fuentes antropogénicas como emisiones de vehículos y chimeneas industriales (Prato Sánchez, 2012).

De acuerdo con el inventario nacional de emisiones, el material particulado es emitido principalmente por la combustión de hidrocarburos en el sector transporte e industrial y se estima que las fuentes móviles (vehículos, motocicletas, etc.) emiten el 80 % del material particulado, mientras que las fuentes fijas (fábricas e industria), emiten el 20 % respectivamente (Varón & Ruiz, 2017).

En los seres vivos, el material particulado causa afectación en la salud, debido a que las pequeñas partículas tienen la capacidad de llegar hasta los pulmones e incluso incorporarse en el torrente sanguíneo afectando el sistema respiratorio y el corazón, pero siendo el problema más crítico en poblaciones sensibles. En los ecosistemas, el primer efecto que se percibe es la limitación de la visibilidad por la formación de bruma, pero, además, pueden ser transportadas por el viento y las corrientes de aire hasta largas distancias e irse precipitando lentamente, donde causarán efectos diversos dependiendo su composición, especialmente acidificación de lagos,

cambios en el balance nutricional de las plataformas marianas, daños en bosques, cultivos sensibles y contribución a la formación de lluvia ácida (EPA, 2018).

Hasta ahora, en las revisiones preliminares se conocen investigaciones de otros países que relacionan estudios de calidad del aire por medio del monitoreo con estaciones de abejas *Apis mellifera* donde analizan los efectos de los contaminantes en estos macroinvertebrados, e incluso, comparan los resultados con estaciones tradicionales para correlacionar los hallazgos, sin embargo, en Colombia no se han encontrado estudios asociados para determinar la presencia y composición del material particulado por medio de estos bioindicadores y aunque estos estudios han evidenciado importantes hallazgos, es de gran relevancia la compilación de datos y estudios realizados en diversas regiones del mundo, teniendo en cuenta que la abeja *Apis mellifera* es una especie introducida que prevalece en más de 20 países del continente americano (Guzmán-Novoa et al., 2011).

Por esta razón, este tipo de investigaciones realizan aportes significativos que permiten explorar otras alternativas que contribuyan a la búsqueda de información frente a la problemática actual de material particulado en el aire teniendo en cuenta su efecto directo sobre la salud de los seres vivos y los ecosistemas.

Objetivos

Objetivo general

- Recopilar información sobre estudios relacionados con abejas *Apis mellifera* como bioindicadores de material particulado en el aire.

Objetivos específicos

- Seleccionar artículos científicos e investigaciones realizadas que reúnan experiencias sobre abejas como bioindicadores.
- Establecer las características fisiológicas y comportamentales de la especie que la clasifican como bioindicadora de la calidad del aire.
- Establecer las variables que influyen de manera significativa en las estrategias de monitoreo.

Marco de referencia

El aire y su composición

El aire es una compleja mezcla gaseosa que rodea la tierra y en condiciones naturales tiene 78,1 % de Nitrógeno, 20,9 % de Oxígeno, y el porcentaje restante lo compone una mezcla de oligogases, agua en estado gaseoso (vapor), y gases de efecto invernadero (Benavides, 2007). El aire se divide en subcapas: tropósfera (0 – 10 km), estratósfera (10 – 50 km), mesósfera (50 – 100 km), termósfera (100 – 500 km) y exósfera (500 – 1000 km) y la temperatura es variable en cada capa dependiendo la altitud (Pabón et al., 2004). La tropósfera es la capa adyacente a la superficie terrestre y se caracteriza porque contiene abundante cantidad de vapor de agua y es donde ocurren gran cantidad de fenómenos meteorológicos, teniendo alta influencia las actividades humanas (Ramírez, 2012).

Contaminación del aire

Se da como resultado de las emisiones atmosféricas (fuentes fijas y móviles) que proceden de fuentes naturales y antropogénicas. Estos contaminantes se transportan y dispersan en el aire en función de la dirección, velocidad de los vientos y condiciones geográficas del territorio (Cantor & López, 2013), sin embargo, también se pueden transformar en otras especies químicas y se han catalogado como contaminantes criterio el material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃) y el monóxido de carbono (CO) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) porque son perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos.

El material particulado

Son partículas sólidas y líquidas que se encuentran en el aire en suspensión, poseen un diámetro aerodinámico menor o igual a $2,5\mu\text{m}$ las cuales se conocen como $\text{PM}_{2,5}$ y con un diámetro aerodinámico cercano a $10\mu\text{m}$, las cuales se conocen como PM_{10} (Cantor & López, 2013). En cuanto a sus composición, el material particulado está compuesto principalmente por sulfato, nitrato, amonio, ion hidrógeno, agua adherida, carbono elemental, aluminio, silicio, potasio, calcio y metales pesados como hierro, zinc, vanadio, titanio, cadmio, plomo, mercurio y antimonio (Argumedo & Castillo, 2016) y estas partículas en los seres humanos pueden penetrar en los pulmones irritando los tejidos e incluso, pueden ser absorbidas por el torrente sanguíneo (Alvis, 2012) ocasionando afectación a la salud.

Bioindicadores naturales

Zuarth et al., (2014), define los bioindicadores naturales como aquellas especies que por sus características (sensibilidad a las perturbaciones ambientales, distribución y abundancia) pueden ser usadas como estimadoras de condiciones ambientales entregando información que puede servir como una medida directa de las variables que intervienen o como un factor indirecto que permite establecer relaciones, interacciones y comportamientos a partir de la valoración de los cambios y/o perturbaciones.

Desde la antigüedad el hombre ha utilizado los bioindicadores naturales como estrategia para la búsqueda del conocimiento científico intentando interpretar y definir las causas asociadas a los cambios ocurridos al medio ambiente como consecuencia de las actividades antrópicas y así mismo, se conocen estudios desde 1948 que explicaban la relación entre ciertas especies y el grado de calidad del agua, entendiendo que muchos organismos vivos presentan algún grado de sensibilidad a los cambios ambientales que ocurren en los ecosistemas (Morales, 2011).

De acuerdo con las características propias de cada especie, los organismos reaccionan de manera diferente ante cualquier perturbación en el medio, encontrándose que los bioindicadores se clasifican en 1) detectores, 2) explotadores y 3) acumuladores, y al mismo tiempo de acuerdo con su tipo, se pueden clasificar como 1) indicadores de biodiversidad, 2) indicadores ecológicos y 3) indicadores ambientales (Zuarth et al., 2014).

Abejas como bioindicadores

El potencial bioindicador de las abejas *Apis mellifera* radica en su hábito de volar durante el día a diferentes alturas y se estima que cada colmena tiene en promedio 40.000 abejas y de este total, una cuarta parte son pecoreadoras, es decir, que son abejas dedicadas a sobrevolar con el fin de obtener polen y néctar, logrando recolectar en esta operación alrededor de 10 millones de micro muestras (Porrini, 2008, citado por Azemar, 2015).

Las abejas, poseen características que les permiten recolectar información del entono, especialmente esta bondad se debe a que es un organismo ubicuo, y su cuerpo está recubierto por pelos de alta sensibilidad lo que permite captar las sustancias volátiles con las que entran en contacto. Además, detecta fácilmente los tóxicos y por lo que visitan gran cantidad de sectores ambientales, hace posibles en su colección en las colmenas hacer los estudios e identificar posibles contenientes de su entorno (Gorza, 2007).

Se considera, además, que la alta sensibilidad de las abejas permite observar cambios relacionados con la bioacumulación de contaminantes, en tanto que estos individuos “pueden presentar cambios de color en los tejidos, cambio del comportamiento de vuelo, degeneración celular etc.” (Azemar, 2015) cambios que están directamente relacionados con las condiciones ambientales que presenta el ecosistema.

En Sur América, las abejas llegaron desde el siglo XVI con los españoles que colonizaron el continente y para la época de los años ochenta ya las abejas se encontraban colonizando distintas regiones latinoamericanas (Montoya, P., Chamorro, F., Nates, 2016). Actualmente, las diferentes especies de abejas (*Apis spp*) se encuentran distribuidas ampliamente en todo el territorio nacional, adaptándose perfectamente a las condiciones climáticas y geográficas, pasando por climas fríos y bosques altoandinos (Silva Garnica et al., 2006).

En todos los casos analizados, las investigaciones muestran la pertinencia de estos insectos para recolectar información relacionada con la calidad del aire, considerando que vuelan durante el día a diferentes velocidades y alturas, lo cual permite integrar variables asociadas a su alto grado de sensibilidad y a la variación de condiciones ambientales de origen natural o antropogénico.

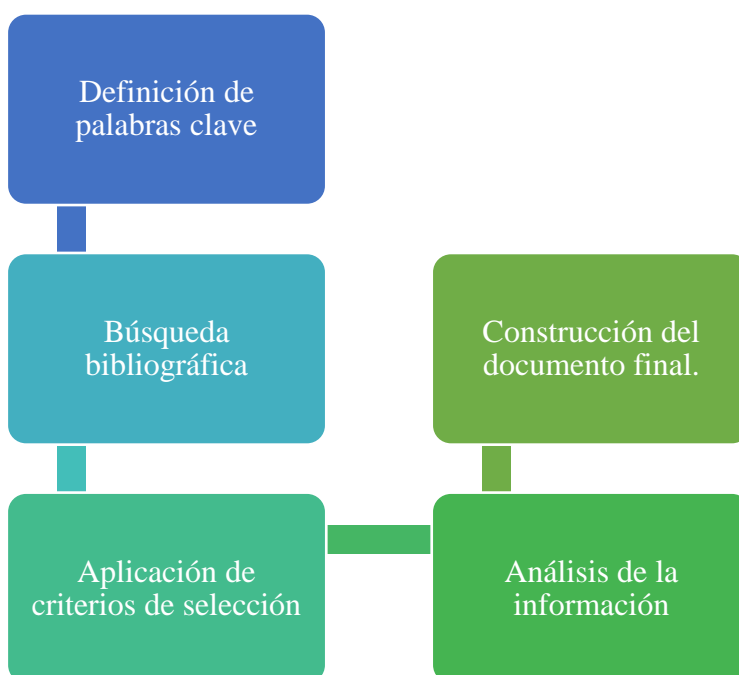
Metodología

Definición de ruta metodológica

Inicialmente se hizo una revisión previa de literatura, se planteó el problema, se definieron objetivos, justificación, se construyó marco teórico y se definió la ruta a seguir para el desarrollo de la investigación como lo muestra la figura 1.

Figura 1.

Ruta metodológica para la revisión de artículos usados en la investigación



Fuente: los autores

Definición de palabras clave

En la revisión de la literatura previamente analizada se definieron los términos más frecuentes y de mayor relevancia por su relación con el tema específico y al mismo tiempo se

revisó que se encontraran dentro de la lista de tesauros de la UNESCO, por ser esta una lista estandarizada de términos útiles para almacenar, recuperar y procesar la información (Bezares & Rojo, 2010). Como resultado de este proceso, se definieron las siguientes palabras clave: “*Apis mellifera*”, “environmental indicator”, “atmospheric contamination” y “particulate matter”.

Búsqueda bibliográfica en bases de datos

Para la búsqueda de información relacionada con el tema se realizó cinco combinaciones de las palabras clave y haciendo uso de operadores booleanos se establecieron vínculos lógicos entre los términos dado que se produce resultados superiores y de mejor calidad en la búsqueda de la información (Villegas, 2003). En todos los casos se utilizó el operador “and” y las combinaciones fueron las siguientes:

1. *Apis mellifera* and environmental indicator
2. *Apis mellifera* and atmospheric contamination
3. *Apis mellifera* and particulate matter
4. *Apis mellifera* and environmental indicators and atmospheric contamination
5. *Apis mellifera* and environmental indicator and particulate matter

Con estas combinaciones de términos se hizo la búsqueda de artículos científicos en las siguientes bases de datos: SciELO, ScienceDirect, Redalyc, Springer Link y otras bases de datos o metabuscadores como Google Académico. Las bases de datos fueron el motor de búsqueda más significativo ya que alojan información de alta importancia con características homogéneas y organizada (Trujillo, 2011) de tal manera que se logró realizar una búsqueda exhaustiva de la temática accediendo a documentos de calidad en el contexto técnico y científico.

Luego, cada artículo encontrado en la búsqueda de las diversas bases de datos fue guardado con un número consecutivo y agrupados de acuerdo con la combinación de palabras clave a la que pertenecía, seguidamente, se construyó una base de datos y finalmente se almacenaron los artículos científicos en Mendeley que es un gestor de referencias bibliográficas libre que permite organizar la información e integrar la citación de referencias bibliográficas desde Word.

Selección de artículos científicos

Para la selección de artículos, se realizó una rúbrica de puntuación basado en la metodología PRISMA la cual está diseñada para facilitar y mejorar el proceso de elaboración de revisiones sistemáticas y metaanálisis (Hutton et al., 2010). Los criterios de esta rúbrica fueron propios de semillero Metamorfo Medellín, teniendo en cuenta los aspectos más significativos en los procesos de credibilidad para una publicación. Cabe recordar que el propósito principal fue la selección de aquellos artículos científicos coherentes con los objetivos de la investigación y que conservan altos criterios de calidad (ver tabla 1). Sin embargo, al respecto Trujillo, (2011) explica que la rigurosidad en la aplicación de los criterios dependerá de la lectura crítica y la capacidad para juzgar con suficiente rigor la calidad de los documentos, lo que permitirá aceptarlos o rechazarlos.

Cada artículo fue valorado en los siguientes aspectos según se evidencia en la tabla 1, éstos son: título, DOI, resumen, introducción, objetivos, metodología, resultados, conclusiones y referencias. A cada ítem se le asignó una calificación de uno a tres. En total se tuvieron en cuenta nueve criterios para la valoración, siendo 27 la máxima calificación.

Tabla 1.*Rubrica de puntuación basado en metodología PRISMA*

Criterios de revisión	Bajo	Medio	Alto
Calificación	1	2	3
Título	No se identifica a través de este si es una revisión sistemática, artículo de revisión o en efecto de investigación relacionado con el tema de estudio.	Se identifica parcialmente si es una revisión sistemática, artículo de revisión o en efecto de investigación relacionado con el tema de estudio.	Se identifica a través de este, si es una revisión sistemática, artículo de revisión o en efecto de investigación relacionado con el tema de estudio.
DOI	El artículo NO posee Digital Object Identifier System, enlace permanente en forma de código alfanumérico que identifica de forma única un contenido electrónico	---	El artículo posea Digital Object Identifier System, enlace permanente en forma de código alfanumérico que identifica de forma única un contenido electrónico
Resumen	No posee una forma estructurada, demostrando en 250 palabras aspectos tales como: antecedentes, objetivos, características de la fuente de estudios, metodología análisis estadístico de datos, resultados y conclusiones o	Posee una forma semiestructurada, no contemplan todos los aspectos relacionados tales como: antecedentes, objetivos, características de la fuente de estudios, metodología análisis estadístico de datos, resultados y conclusiones o hallazgos significativos.	Posee una forma estructurada, demostrando en 250 palabras aspectos tales como: antecedentes, objetivos, características de la fuente de estudios, metodología análisis estadístico de datos, resultados y conclusiones o hallazgos significativos.

hallazgos significativos.

Introducción	No se evidencia un soporte teórico claro, que respalda la investigación, además, justifica claramente las necesidades de investigación	Se tiene un poco de soporte y además la justificación no es tan contundente para la investigación.	Se evidencia un soporte teórico claro, que respalda la investigación, además, justifica claramente las necesidades de investigación
Objetivos	No describe de forma explícita la(s) pregunta(s) de investigación, la cual debe estar incorporada en la introducción.	Se describe de forma vaga la(s) pregunta(s) de investigación, la cual debe estar incorporada en la introducción.	Se describe de forma explícita la(s) pregunta(s) de investigación, la cual debe estar incorporada en la introducción.
Metodología	El artículo posee NO un diseño experimental planeado, ni menos un protocolo de desarrollo experimental que acompañe la actividad investigativa.	El artículo posee algunos aspectos que dan cuenta del diseño experimental, además posee un protocolo de manera vaga aspectos experimentales que acompañen la investigación.	El artículo posee un diseño experimental planeado, o en efecto un protocolo de desarrollo experimental que acompañe la actividad investigativa.
Resultados	Los resultados NO se evidencian claramente en el artículo, se sugieren algunas cifras, pero estas NO dan respuesta a la metodología planteada.	Los resultados, aunque se evidencian no se reportan replicados y además no hay manera de asegurar la confiabilidad estadística, dan respuesta a la metodología planteada.	Los resultados se reportan replicadas en la que permiten dar una confiabilidad estadística de la ejecución metodológica y estos dan respuesta a la metodología planteada.

Conclusiones	No proporciona una interpretación general de los resultados en el contexto de otra evidencia, y las implicaciones para la investigación futura	Proporciona alguna(s) interpretación(es) general(es) de los resultados en el contexto de otra evidencia, y las implicaciones para la investigación futura	Proporciona una interpretación general de los resultados en el contexto de otra evidencia, y las implicaciones para la investigación futura
Referencias	El artículo no posee referencias actualizadas y no cuenta con las características que están dentro del background proyectados en la investigación.	El artículo posee algunas referencias actualizadas y algunas características que están dentro del background proyectados en la investigación.	El artículo posee referencias dentro del rango de estudios proyectados dentro de los objetivos de investigación.

Fuente: los autores

Adicional al proceso anterior, se aplicaron los siguientes criterios de exclusión: artículos duplicados y que no guardaban coherencia con el objetivo de la investigación. Por último, se clasificaron los artículos científicos que fueron publicados desde el año 2010 hasta la fecha, con el fin de realizar una revisión sistemática actualizada, se hizo análisis gráfico de los hallazgos y se determinó la ecuación bibliométrica.

Resultados y discusión

Resultados de la búsqueda bibliográfica

Inicialmente, se realizó consulta en bases de datos y buscadores para determinar las variables que intervienen o tienen relación con las abejas como bioindicadores de material particulado en el aire. Por tal motivo, en la primera fase y siguiendo la ruta metodológica se construyeron y probaron las ecuaciones de búsqueda a partir de la combinación de palabras clave con el objetivo de perfilar los resultados de la exploración y como resultado de este proceso se obtuvo que la ecuación 1 representa la mejor búsqueda:

$$\text{APMPA} = (\text{A} + \text{X and Y}) + (\text{A} + \text{X and Z}). \text{ Ecuación 1}$$

Donde,

APMPA: Abejas *Apis mellifera* como bioindicadores de material particulado en el aire

A= *Apis mellifera*

X= environmental indicators

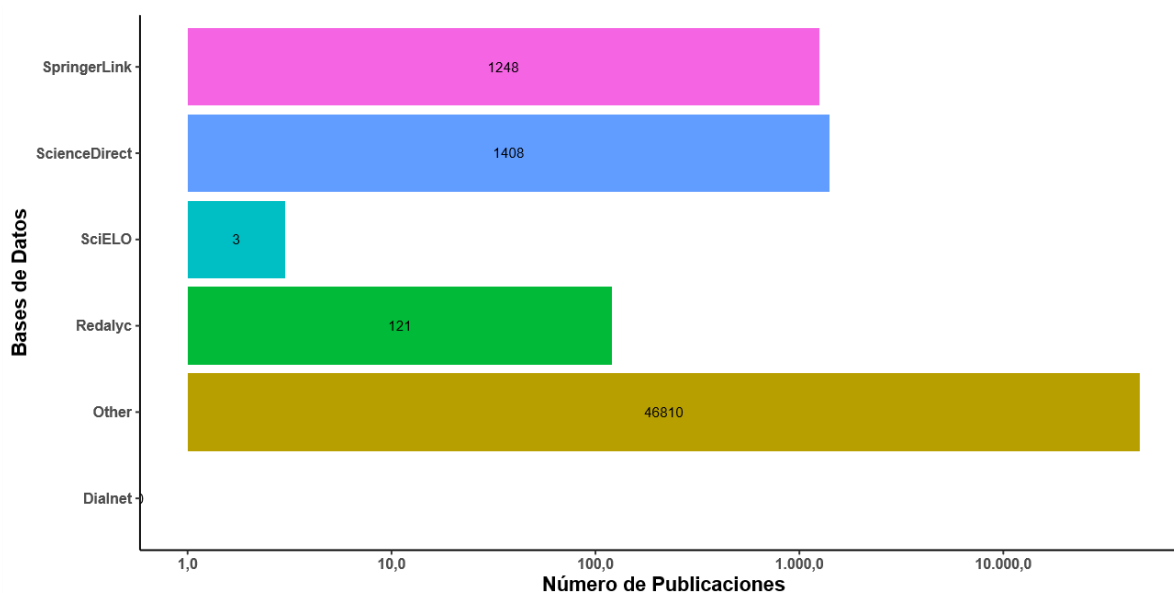
Y= atmospheric contamination

Z= particulate matter

Por otra parte, los resultados de la búsqueda bibliográfica permiten evidenciar que se obtuvo un total de 49.590 resultados, de los cuales el 94 % fueron obtenidos de “otras bases de datos”, mientras que solo el 2,8 % y 2,5 % fueron obtenidos de ScienceDirect y Springer Link respectivamente, como lo muestra la figura 2. Es importante resaltar que para la base de datos como Dialnet no se obtuvieron resultados.

Figura 2.

Resultados obtenidos por base de datos



Fuente: los autores

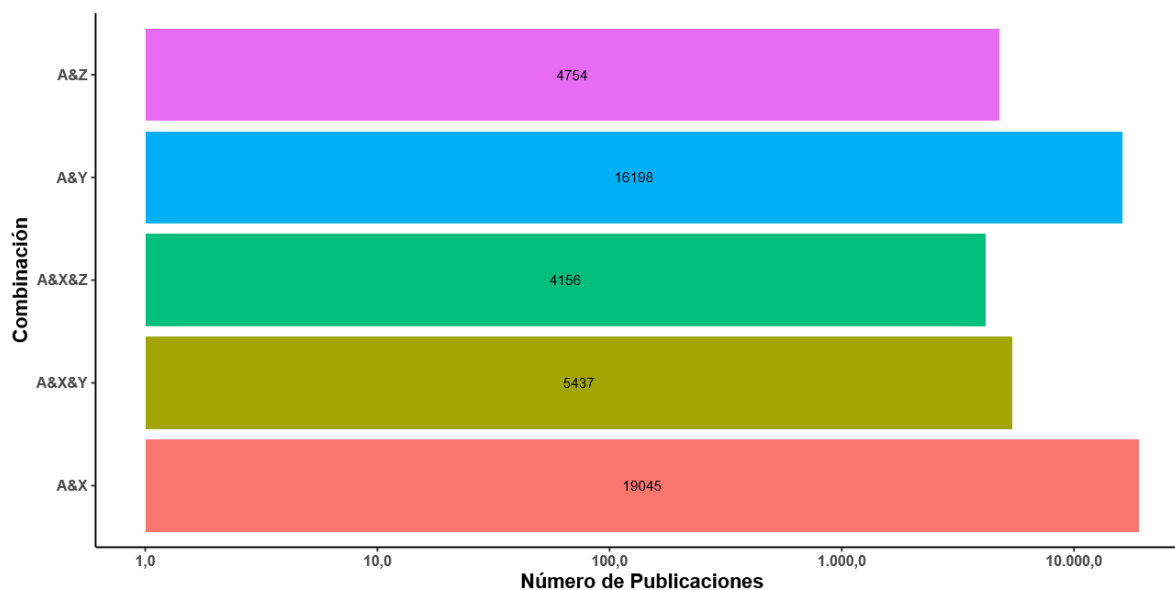
Aunque se hizo una búsqueda específica en bases de datos reconocidas, los resultados obtenidos no fueron significativos, lo que indica que no existen muchos artículos publicados al respecto y por este motivo se realizó búsqueda de artículos relacionados en “otras bases de datos” lo cual agrupa artículos de diversas publicaciones.

En cuanto a los resultados obtenidos por combinación de palabras clave, los mayores resultados se obtuvieron para “*Apis mellifera* and environmental indicator” con el 38 % y para “*Apis mellifera* and atmospheric contamination” con el 33 % respectivamente.

En la figura 3, se representa gráficamente el resultado de la búsqueda según las palabras clave y se evidencia que a medida que se iban combinando las palabras hacia una búsqueda más específica, iban disminuyendo proporcionalmente los resultados obtenidos.

Figura 3.

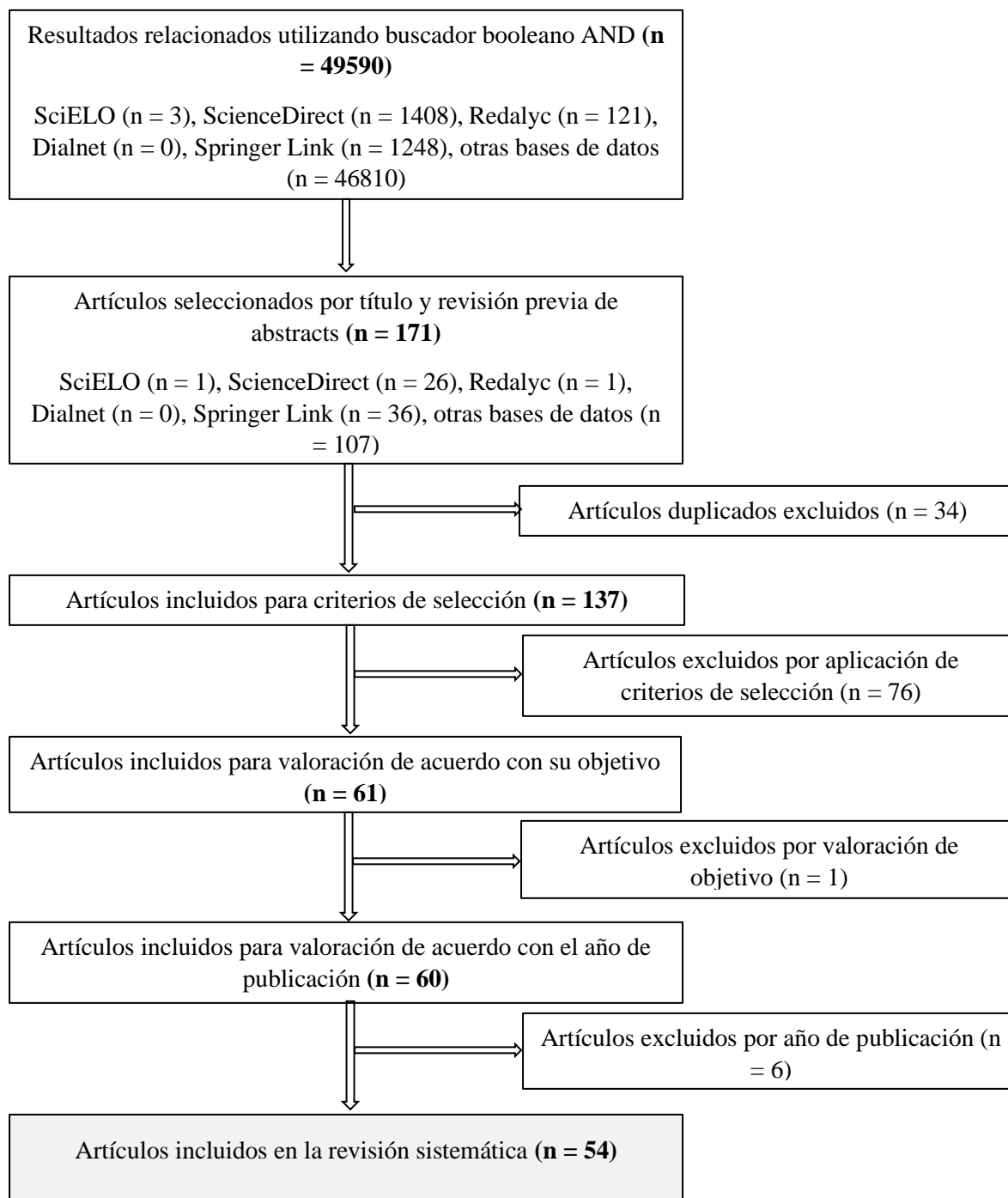
Resultados obtenidos por combinación de palabras clave.



Fuente: los autores

Resultados de la selección y clasificación de artículos

La aplicación de criterios definidos en la Tabla 1., permitió depurar la información y seleccionar los artículos que cumplieran con los más altos estándares de calidad según la aplicación de la rúbrica de puntuación y en la figura 4 se ilustra el proceso de clasificación de la información. Como se puede observar en esta figura, en todo este proceso se contabilizaron 49.590 resultados de los cuales solamente se incluyeron 170 resultados para aplicación de la rúbrica de puntuación y el resto de los artículos fueron descartados en la revisión previa de abstract por no estar asociados con el objetivo de la investigación llegando a un resultado final de 54 artículos.

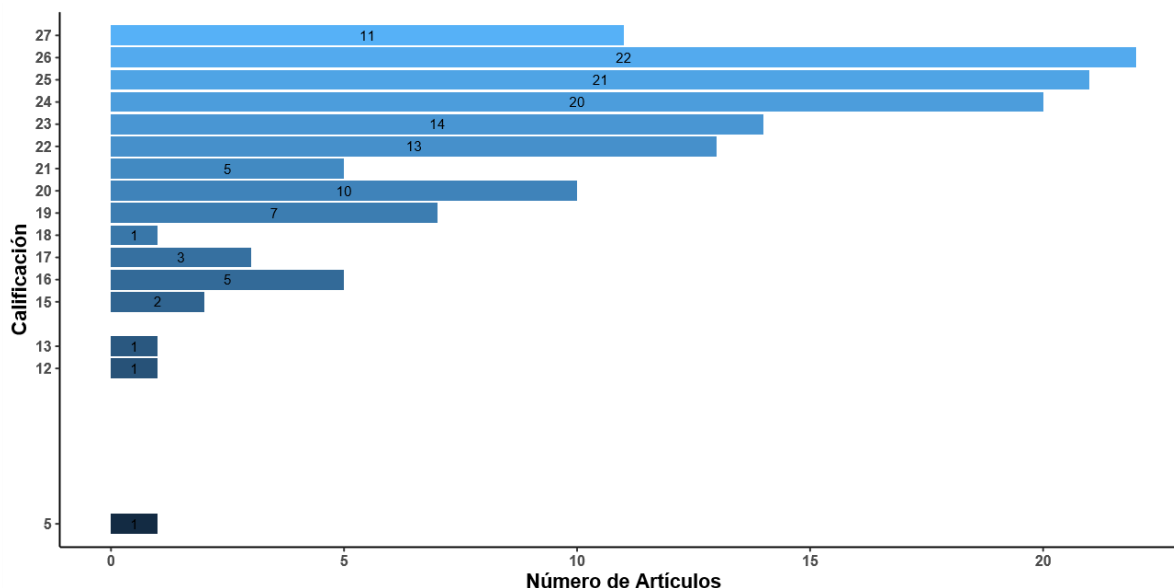
Figura 4.*Selección de artículos*

Fuente: los autores

En la figura 5., se muestran los resultados de las puntuaciones en los 54 artículos analizados, las últimas tres representan la cantidad de artículos que obtuvieron mayor calificación luego de aplicación de la rúbrica de puntuación y se puede apreciar que de los 170 artículos procesados, solamente 54 artículos (32 %) obtuvieron una calificación mayor o igual a 25 y fueron incluidos en la revisión bibliográfica.

Figura 5.

Resultados de la aplicación de la rúbrica de puntuación



Fuente: los autores

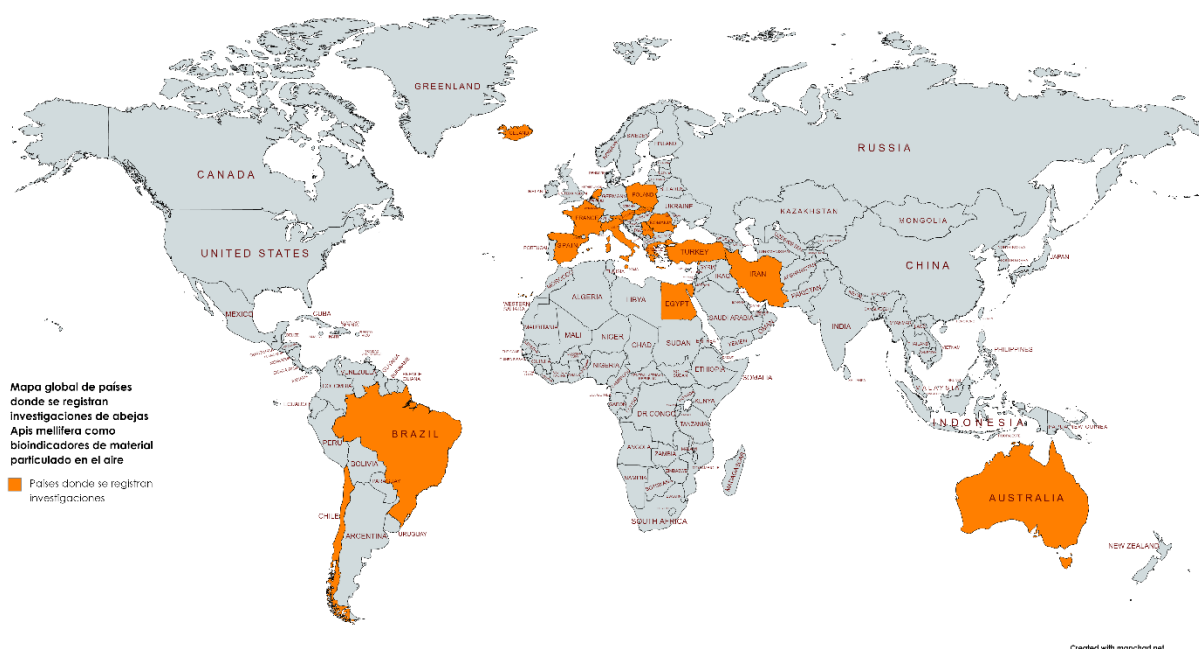
Estudios de abejas *Apis mellifera* como bioindicadores en el mundo

Actualmente se consiguen diversos estudios que relacionan abejas *Apis mellifera* con contaminación ambiental asociada a plaguicidas, sin embargo, en el caso de las abejas como bioindicadores de material particulado en el aire, la mayoría de los estudios asociados se han

encontrado en Europa y en la figura 6, se muestran los respectivos países donde se encontraron estudios durante la búsqueda de información para esta investigación.

Figura 6.

*Países donde se registran investigaciones de abejas *Apis mellifera* como bioindicadores de material particulado*



Fuente: los autores

Estudios de abejas *Apis mellifera* como bioindicadores en Latinoamérica

Aunque el continente americano se considera uno de los más urbanizados en el mundo (UN, 2013), lo cual significa que existe contaminación atmosférica asociada, solamente en Brasil y Chile se reportan investigaciones relacionadas con abejas como bioindicadores de material particulado en el aire.

En Brasil, Nunes et al., (2015) realizó una investigación utilizando técnicas de morfometría con el objetivo de establecer la relación que existe entre la asimetría de las alas de la abejas *Apis mellifera* y la contaminación por material particulado en el aire, encontrando que las muestras de abejas recolectadas en territorios con mayores índices de perturbación o intervención antrópica, presentan mayor asimetría de las alas y por lo tanto, consideraron que las abejas son indicadoras del grado de contaminación y antropización del medio ambiente.

Así mismo, en el Estado de Paraná de este mismo país, se hizo un estudio con el objetivo de medir las concentraciones de once elementos metálicos representativos (Al, Ca, Cd, Cr, Cu, K, Mg, Mn, Na, Pb y Zn) en el propóleo de las abejas utilizando un método electrotérmico de atomización y espectrometría de absorción atómica de llama, donde concluyeron que efectivamente las abejas y los subproductos, son un bioindicador efectivo de la contaminación ambiental (Finger et al., 2014), y cuyos resultados concuerdan con Matin et al., (2016) que también detectó elevados niveles de contaminación por metales pesados presentes en el propóleo en su investigación realizada.

En Chile, Bastías et al., (2013) llevó a cabo una investigación para determinar la presencia de Arsénico (As) en muestras de miel de abejas donde hay influencia de actividad volcánica y para ello utilizaron un método de espectrofotometría de absorción atómica acoplado con un generador de hidruro y en sus resultados lograron confirmar que la miel de las abejas es un buen indicador de la contaminación ambiental dado que su estudio comprobó que la contaminación presente por Arsénico (As) era proveniente de erupciones volcánicas, minería y actividades antrópicas en general. Además, detalla la investigación que después de una erupción volcánica se registraron las concentraciones más altas de este elemento, las cuales oscilaron entre 2,2 a 171,9 $\mu\text{g kg}^{-1}$ mientras que antes de este evento natural se registraron valores significativamente bajos y

de igual manera, al comparar los resultados de las diferentes regiones analizadas, los valores con concentraciones más altas coincidieron con zonas afectadas por la influencia de las explotaciones mineras y la erupción volcánica. Del mismo modo, Martínez et al., (2013) en una investigación análoga, analizó la influencia de la ceniza volcánica sobre las plantas y sus posibles consecuencias en la apicultura, encontrando varias perturbaciones en las abejas como resultado de la contaminación por ceniza volcánica, aunque las abejas mostraron capacidad de reconocer las flores cubiertas de ceniza después de un proceso de adaptación.

Finalmente, las abejas son biosensores que pueden ser manejados para validar información sobre contaminación ambiental (Căuia et al., 2020) y así lo confirman Nenad M. Zarić, Ilijević, et al., (2018) en su investigación que logró diferenciar y agrupar la contaminación por zonas en territorios, valiéndose de métodos estadísticos multivariados para procesar los resultados de las muestras, lo que también comprobó J. J.M. van der Steen et al., (2016), al descubrir que las concentraciones de metales varían de acuerdo a las características de cada región.

Características fisiológicas y comportamentales de la especie que la clasifican como bioindicadora

Las concentraciones de metales pesados presentes en el cuerpo de las abejas y los subproductos (miel, propóleo y polen), son una representación de la contaminación de múltiples ecosistemas del medio ambiente: atmósfera, litosfera e hidrósfera. La interacción de estos insectos con los distintos medios y la disposición de sus cuerpos peludos facilitan la absorción, transporte y transferencia de los contaminantes (Nenad M. Zarić, Deljanin, et al., 2018), lo cual permite considerar que estos artrópodos tienen la capacidad para detectar y generar alertas

tempranas sobre los cambios antropogénicos que ocurren durante largos periodos de tiempo (Sadeghi et al., 2012).

Por ello cuando ocurre una muerte súbita o el dramático deceso de un número importante de individuos que componen la colmena es un indicador de elevados niveles de contaminación y existen múltiples causas asociadas lo cual se podría atribuir al llamado Trastorno por Colapso de Colonias (CCD) que fue un fenómeno que se registró posterior al año 2000 donde las abejas obreras comenzaron a desaparecer abruptamente de sus colonias (Polykretis et al., 2016).

Por otro lado, Williams et al., (2010) coincide en que las abejas poseen alta sensibilidad y tienen la capacidad de responder a diferentes tipos de perturbaciones ambientales debido al tamaño y forma del cuerpo, método de construcción de la colmena, característica social y especialización trófica, mientras que Davodpour et al., (2019) explica que su amplio comportamiento en la búsqueda de alimento las convierte en una especie con gran potencial para vigilar la calidad del medio ambiente, especialmente para la detección de metales tóxicos y esenciales (Cd, Cr, Cu y Fe) en los cuales centró su investigación y logró concluir que existe una estrecha relación entre las abejas y los cambios en el medio ambiente (agua, suelo, aire y plantas) y por lo tanto, todos los hábitos inherentes a su morfología y comportamiento la definen como un bioindicador fiable de la contaminación del medio ambiente.

Gracias a la elevada movilidad de abejas obreras durante el día alrededor de la colmena, el número de individuos que la conforman que puede estar alrededor de 40.000 abejas obreras (Azemar, 2015), su hábito prácticamente ubicuo y la facilidad para localizarlas en cualquier zona geográfica, permite definir protocolos normalizados para su reproducción y el diseño de sistemas de vigilancia de calidad del aire, teniendo en cuenta que la contaminación por material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$) es uno de los principales problemas de calidad del aire asociado a

entornos urbanos y se deben implementar modelos indicativos para obtener información sobre la calidad del aire porque arrojan resultados indirectos del riesgo real de la exposición de los seres vivos a la contaminación atmosférica (M. Gutiérrez et al., 2015).

Entre tanto, los metales pesados presentes en el material particulado, en la mayoría de los casos no tienen la capacidad de causar mortalidad en las abejas; éstos son capaces de biomagnificarse, bioacumularse e incorporarse en los ciclos biológicos (Perugini et al., 2011). Así mismo, estudios realizados en los Países Bajos, sugieren que para lugares que representen bajos niveles de contaminación atmosférica no es posible establecer con certeza una relación entre la concentración de contaminantes y los niveles encontrados en las abejas y sus subproductos, sin embargo, recomiendan que es importante aplicar estos modelos indicativos con abejas en territorios con altos niveles de contaminación atmosférica (Jozef J. M. Van der Steen et al., 2015).

Durante el proceso de transformación de la materia prima para la elaboración de miel y cera, la abeja elimina las impurezas de sus productos y durante esta fase podría acumular contaminantes en sus tejidos. Por otra parte, la variabilidad en las condiciones climáticas o estacionales también representan un factor importante en las concentraciones de metales presentes en el cuerpo de las abejas (Skorbiłowicz et al., 2018) y este fenómeno se asocia posiblemente a la dispersión y transporte de los contaminantes durante las distintas épocas del año.

Por su parte, Zuarth et al., (2014), en su publicación “los bioindicadores ¿una alternativa real para la protección del medio ambiente?” explica que las abejas pecorean con mayor frecuencia en un radio de 1,5 km alrededor de su colmena, aunque también se pueden desplazar hasta 10 y 12 km alrededor dependiendo la disponibilidad y necesidad de alimentos. Durante

estos recorridos que realizan a diferentes velocidades y alturas, capturan sustancias volátiles en su cuerpo e incluso se conoce en una investigación realizada en Fukushima , después del accidente nuclear, que las abejas pueden capturar isotopos radiactivos, aunque en detalle no se recogieron suficientes evidencias para hacer esta afirmación, sugieren profundizar en la investigación dado que durante el año 2012 se detectó que la presencia de radionúclidos en el cuerpo de las abejas dejó de disminuir y por el contrario presentó un leve incremento, lo cual podría tener relación con el accidente nuclear (Borawska et al., 2013). Permitiendo concluir hasta este punto que existen soportes que apoyan la hipótesis sobre las abejas y su capacidad de sensibilizarse ante altas concentraciones de contaminantes en el material particulado.

Variables que influyen de manera significativa en las estrategias de monitoreo

Múltiples investigaciones realizadas muestran la capacidad que tienen las abejas para recoger o capturar material particulado en sus cuerpos (Nenad M. Zarić et al., 2017) y todo lo anterior nos permite conocer las variables que definen las abejas como bioindicadores, dado que al mismo tiempo, existen diversas investigaciones que han demostrado de manera específica que los metales pesados acumulados en los tejidos de las abejas dependen de la concentración de los mismos en la atmósfera (Costa et al., 2019) y por lo tanto estas variables son las siguientes:

Muerte súbita de las abejas

Investigaciones recientes sobre estos fenómenos de muerte súbita en las abejas se orientan hacia diversas causas y siguiendo lo expuesto por Polykretis et al., (2016) este evento atípico principalmente ocurre cuando existe ataque de patógenos, presencia de pesticidas en el entorno, pérdida de hábitat y altos índices de contaminación. Entre tanto, Goretti et al., (2020) desarrolló una investigación para determinar el Índice de contaminación de las abejas de la miel (HCI) basado principalmente en la bioacumulación de metales pesados y para su estudio se apoyaron en

la determinación de los elementos metálicos presentes en el material particulado (PM_{10}) y su ecuación consistió en establecer la relación entre el umbral relativo y la concentración de metales pesados multiplicado por el logaritmo natural y como resultado de la cuantificación de este episodio, logró expresar sintéticamente el grado de contaminación y cuantificarla para emitir un juicio objetivo sobre la calidad del aire. Sin embargo, concluye su investigación sugiriendo que existen otras fuentes de contaminación distintas al material particulado y que son de importancia en los efectos causados a las abejas como los plaguicidas, fertilizantes y desarrollo de actividades antrópicas.

Al respecto, Dabour et al., (2019) realizó una investigación para estudiar los efectos en la estructura histológica y celular en el intestino de las abejas, para lo cual las alimentaron en condiciones de laboratorio durante nueve días con jarabe de azúcar combinado con nanopartículas subletales de PbO y CdO. Su exploración se centró en identificar los daños celulares en el intestino de las abejas mediante el análisis de citometría de flujo y si bien se encontraron alteraciones histopatológicas con esta evidencia encontrada solamente se puede concluir que aunque sean concentraciones crónicas subletales tienen el potencial para afectar negativamente la viabilidad de la colonia, sin embargo, no es un estudio concluyente que demuestre que las nanopartículas subletales de PbO y CdO ocasionan muerte súbita en las abejas.

En un estudio similar en condiciones de laboratorio, se utilizaron marcadores bioquímicos: glutatión-S-transferasa (GST), acetilcolinesterasa (AChE), fosfatasa alcalina (ALP) y metalotioninas (MT) para generar estrés oxidativo en las abejas e inducir toxicidad subletal por la presencia de compuestos neurotóxicos, sin embargo, lograron elaborar perfiles de respuesta neural y metabólica concluyendo que a través de este estudio se puede determinar la presión

ambiental a la que están sometidos los individuos, pero no existió una correlación directa con los índices de mortalidad en las abejas estudiadas (Badiou-Bénéteau et al., 2013).

Por otra parte, Dixon et al., (2014) en un estudio de trayectoria de la colmena, encontró que cuando la reina muere, logran sobrevivir algunas obreras larga vida y los demás individuos van muriendo progresivamente lo que indica que la actividad reproductiva les concede una ventaja significativa de supervivencia.

Presencia de metales pesados en el cuerpo de la abeja

El material particulado presente en el aire contiene metales pesados que son adheridos al cuerpo de la abeja y, en consecuencia, al realizar biomonitorio es posible encontrar elementos metálicos que superan los umbrales como ocurrió en Italia, donde Ruschioni et al., (2013) realizó monitoreo durante tres años y encontró que hubo ausencia de plaguicidas en el cuerpo las abejas, pero sí presencia de metales pesados y especialmente altas concentraciones de Cromo (Cr). De manera similar, en Irán, utilizando técnicas de espectrofotometría de emisión de plasma-óptica (ICP-OES) Aghamirlou et al., (2015) evaluaron la presencia de metales pesados en la miel de abejas y encontraron que en la región oriental la concentración de metales pesados era más alta, lo cual se asocia con la posible interferencia de las zonas industriales que liberan contaminantes a la atmósfera y detectaron concentraciones máximas de plomo (Pb) de 935,48 µg/kg en la miel, valores muy por encima del promedio reportado en las zonas donde había ausencia de industrias.

Las actividades industriales, antropogénicas y la movilidad dentro de las áreas urbanas son las fuentes de los principales metales pesados presentes en las abejas, concluye Skorbiłowicz et al., (2018). Por otra parte, en los Países Bajos se evaluó la variación espacial y temporal de la concentración de metales traza presentes en el cuerpo de las abejas y finalmente los resultados

indicaron que las abejas se pueden utilizar para detectar patrones de contaminación por metales traza, incluso en concentraciones relativamente bajas (Jozef J.M. Van Der Steen et al., 2012). Por su parte, M & Maleviti E., (2014) analizó el comportamiento en las concentraciones de algunos metales en relación con la altitud y encontró que el Cromo (Cr), Litio (Li) y Níquel (Ni), aumentan a medida que se incrementa la altura sobre el nivel del mar y este hallazgo es importante para considerarlo dentro de las investigaciones para definir umbrales mínimos de la presencia de contaminantes.

En Irán, se realizó una investigación para evaluar la presencia de metales tóxicos y esenciales (Cd, Cr, Cu y Fe) en el cuerpo de las abejas mediante la digestión ácida de las muestras utilizando espectrómetros de emisión plasma-ópticos acoplados inductivamente y encontraron que elevadas concentraciones de estos metales lo cual les permitió concluir que las abejas se pueden utilizar para detectar los patrones de contaminación atmosférica (Davodpour et al., 2019).

Respecto a este mismo tema, una evaluación realizada para determinar la presencia de metales pesados (Pb, Ni y Cd) en el material particulado (PM_{10}) fue correlacionada con las concentraciones encontradas en el cuerpo de las abejas y efectivamente esta comparación mostró una estrecha dependencia luego del cálculo de regresiones lineales y se encontró por ejemplo que, cuando la concentración de plomo en la atmósfera estaba en 4 ng/m^3 las abejas tenían una concentración de $0,7 \text{ mg/kg}$ y concluyeron que el material particulado es el responsable en gran mayoría de la presencia de los metales pesados en las abejas (Costa et al., 2019). Al mismo tiempo, este estudio y otro similar demostró con certeza que los metales pesados acumulados en las abejas dependen de la concentración y composición del material particulado presente en el

aire y su análisis logró definir que existe una relación directamente proporcional (Borg & Attard, 2020).

A propósito de la presencia de metales pesados en las abejas, Gizaw et al., (2020) estudió la concentración de metales pesados en las abejas en zonas agrícolas, montañosas y urbanas lo cual le permitió detectar que en las zonas urbanas se registraron valores considerablemente más altos que en las regiones montañosas o selváticas lo cual sugiere que las abejas responden activamente a los agentes estresantes como la presencia de metales pesados en el medio ambiente y con este planteamiento coincide Giglio et al., (2017), el cual realizó una investigación similar en Trieste (Italia) y obtuvo resultados análogos a las afirmaciones anteriores.

Cerca de las plantas de energía térmica en Mugla (Turquía), se realizó análisis en cuerpos de abejas y miel de la colmena para determinar si existía presencia de oligoelementos y encontraron que los niveles de plomo (Pb) y Cadmio (Cd) en las muestras de los cuerpos de abejas eran relativamente más altos que los reportados en las muestras de miel de la misma colmena lo cual sugiere que la abeja es mejor indicador ambiental que los subproductos (Silici et al., 2016).

Paralelamente, Zhou, Taylor, & Davies, (2018) analizaron la presencia de oligoelementos en abejas *Apis mellifera* en comparación con *Tetragonula carbonaria* y aunque encontraron que las composiciones isotópicas de Plomo (Pb) fueron similares en ambas especies y sus respectivos subproductos, pudieron determinar que en términos generales las concentraciones reportadas en *Tetragonula carbonaria*, fueron más altas, lo cual tiene relación posiblemente con su hábito de vuelo que es más amplio y sugieren que esta especie tiene mejor desempeño como bioindicador, aunque su abundancia es relativamente moderada.

Presencia de contaminantes en los subproductos

Los subproductos de la abeja: miel, polen y propóleo, son recolectados y elaborados por las mismas abejas obreras y son el resultado de la combinación de múltiples submuestras lo cual representa un potencial importante para evaluar la contaminación. Al respecto, Al Naggar, (2013) determinó la concentración de metales pesados presentes en las abejas, el polen y la miel de la misma colmena y encontró que la presencia de los mismos metales se registró en concentraciones proporcionalmente decrecientes en el siguiente orden: cuerpo de las abejas, miel y polen. En consecuencia, Lambert et al., (2012) también encontró que el cuerpo de las abejas es más sensible para detectar contaminación por Plomo (Pb) y en un análisis reportado para determinar presencia de hidrocarburos policíclicos aromáticos Lambert, Veyrand, et al., (2012), junto con otro estudio de Kargar et al., (2017) reportan que la miel mostró el nivel más bajo de contaminación, mientras que las muestras del cuerpo de las abejas registraron el valor más alto de contaminación y el polen registró un solo episodio de contaminación elevado, lo cual también coincide con Zhou et al., (2018) que encontró relaciones similares.

Por otra parte, Sager, (2017) realizó análisis en miel de abejas monoflorales con el objetivo de encontrar un valor de referencia eliminando variables que interfieren, pero a pesar de esto, no encontró diferencias significativas y concluyó que el origen de las plantas y la composición del suelo, afectan los resultados puesto que encontró diferencias muy pequeñas dentro de zonas urbanas, suburbana y agrícolas, sugiriendo en este estudio que así no existan niveles de contaminación atmosférica, los resultados van a revelar presencia de algunos contaminantes como consecuencia de la interacción con suelo y vegetación. Por el contrario, Squadrone et al., (2020) analizaron la concentración de contaminantes en mieles multiflorales de

diversos países, pero llegaron a la misma conclusión de que existe una fuerte influencia entre la región de origen y la composición química de la miel.

De manera similar, en Turquía, se realizó un estudio para determinar la presencia de bifenilos policlorados en muestras de abejas, miel y polen, pero encontraron una relación significativa entre los resultados asociados con las condiciones meteorológicas y el reporte de contaminantes en el área de influencia (Sari et al., 2020), entre tanto, investigación realizada por Satta et al., (2012), confirma la veracidad en el empleo de las matrices asociadas a la colmena (abejas, miel, propóleo y polen) para detectar presencia de contaminantes en territorios afectados o con influencia de minería, sin embargo, advierten que las concentraciones encontradas en la miel no es representativa para relacionarla con el nivel real de la contaminación ambiental. De manera divergente a estos hallazgos, Bittar et al., (2018) propuso y demostró que el uso de nanopartículas de plata sin estabilizador para la detección de plomo en la miel es un método efectivo y sensible que entrega resultados cuantificables y seguros. Otro resultado encontrado, afirma que efectivamente la abeja funciona como barrera biológica o biofiltro impidiendo que la contaminación ambiental llegue hasta la miel (Džugan et al., 2018).

En contraste con los hallazgos encontrados, un reporte donde se aplicaron bioensayos para determinar el impacto de varios elementos en estado redox de la abeja melífera y la actividad de las principales enzimas antioxidantes y su expresión genética, afirma que las concentraciones totales de contaminantes encontradas en estos estudios no se pueden extrapolar fácilmente al medio ambiente (Nikolić et al., 2016), lo cual pone en duda las afirmaciones de los demás autores.

Por otro lado, en Córdoba (España) se analizó la concentración de metales pesados presentes en el polen de las abejas mediante estudios realizados en los años 2007, 2009 y 2010 y

como hallazgo significativo se obtuvo que las muestras de néctar superaron los umbrales de referencia al igual que las investigaciones realizadas en el cuerpo de las abejas, lo que revela que ambos métodos aportan información complementaria válida para apoyar los sistemas de vigilancia de la calidad del aire (M. Gutiérrez et al., 2020).

Adicionalmente, Gajger et al., (2019) evaluaron la presencia de contaminantes en los paneles (cera) de la colmena antiguos y recién construidos y lograron detectar que era evidente la presencia de contaminantes por Cromo (Cr), Plomo (Pb), Cobre (Cu) y Níquel (Ni), por las altas concentraciones encontradas y entre tanto, Hladun et al., (2013) reportaron cantidades subletales de Selenio (Se) incorporadas en las larvas de las abejas.

Finalmente, en un estudio publicado en la revista “Environmental Toxicology and Chemistry”, encontraron que los contaminantes metálicos Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Plomo (Pb) y Selenio (Se) tienen el potencial de afectar la colmena en su conjunto cuando se presenta contaminación y esto sugiere que tanto el cuerpo de la abeja, como los subproductos tienen alto potencial bioindicador (Hladun et al., 2016).

Asimetría en las alas

La alta sensibilidad que poseen las abejas, no solo se manifiesta por la mortalidad, presencia de moléculas tóxicas en su cuerpo y subproductos, sino que también tiene la capacidad de modificar la estructura morfológica dado que una investigación realizada con el fin de analizar la plasticidad fenotípica y la forma de las alas de la abeja mediante técnicas de asimetría fluctuante, basada en morfometría geométrica de las colmenas localizadas en territorios con bajos niveles de contaminación, logró demostrar importantes diferencias bilaterales que confirman que las alas de las abejas que se encuentran localizadas en territorios con mayor perturbación humana

poseen mayor asimetría en la forma de las alas, lo cual es un indicador del grado de antropización ambiental (Nunes et al., 2015) y si bien no se conocen más investigaciones utilizando técnicas de asimetría, esta característica encontrada abre la puerta para el desarrollo de futuras investigaciones.

La abeja *Apis mellifera* como bioindicador de material particulado en el aire

El constante aumento poblacional ha provocado el aumento de la contaminación antropogénica de la atmósfera dado que en su gran mayoría las fuentes de contaminación están relacionadas con la industria, el tráfico vehicular, la urbanización y la agricultura intensiva (N. M. Zarić et al., 2016). Las abejas *Apis mellifera* son una alternativa para la vigilancia de la calidad del aire dado que tienen la capacidad de recoger partículas y estudios realizados por Negri et al., (2015) confirman y demuestran que las abejas pueden ser usadas como muestreadores activos de material particulado en el aire y que específicamente capturan la mayoría de material particulado en su cuerpo a lo largo del margen costero y el ápice de las alas delanteras, en el plano medio de la cabeza y la superficie interior de las patas traseras, lo cual se relaciona con las características aerodinámicas empleadas para volar.

El planteamiento anterior confirma su potencial bioindicador de la presencia de material particulado en el aire, pero teniendo en cuenta todas las variables que influyen de manera significativa en las estrategias de monitoreo y como parte de los aportes que tiene esta investigación, es la propuesta de que la abeja *Apis mellifera* es un buen bioindicador relacionado con la presencia de contaminación por material particulado en el aire cuando se cumple que:

$$P = \frac{x}{2} + y + z + w. \text{ Ecuación 2}$$

Donde,

P = Presencia de contaminación por material particulado en el aire

x = muerte súbita de las abejas

y = presencia de metales pesados en el cuerpo de la abeja por encima de los umbrales reportados en la literatura

z = presencia de contaminantes en los subproductos por encima de los umbrales reportados en la literatura

w = presencia de asimetría en las alas según lo reportado en investigaciones

Para realizar el cálculo se debe asumir que todas las variables son dicotómicas, es decir, si no se presenta el evento se coloca cero (0) y si existe presencia se asigna un valor de uno (1) y, en consecuencia, los resultados se pueden interpretar de la siguiente manera:

Tabla 2.

Interpretación de los resultados de la ecuación propuesta

Valor obtenido	Presencia de contaminación por material particulado en el aire
0 – 1	Ausente
1,1 - 2	Leve
2,1 - 3	Moderado
> 3,1	Severo

Fuente: los autores

Conclusiones

Las abejas *Appis mellifera* actúan como bioindicadores de material particulado en el aire y por lo tanto si es posible establecer su presencia y composición. Ésta manifestación se podrá encontrar de tres formas: muerte súbita de los individuos que la conforman, presencia de moléculas tóxicas adheridas a su cuerpo o encontradas en los subproductos (propóleo, miel y polen) y modificaciones atípicas en la morfología de su cuerpo, sin embargo, para considerarlas como bioindicadores no se tienen que cumplir todas las variables, puesto que al encontrar que se cumplen mínimo dos variables de interés, ya existen indicios de que se presenta un fenómeno relacionado.

Los contaminantes encontrados en el cuerpo de la abeja tienen mayor relación con la contaminación atmosférica, seguido del propóleo y por último la miel, lo que indica que la abeja se presenta como una barrera o filtro biológico para impedir que la contaminación afecte sus productos, sin embargo, aunque sea en menores cantidades las concentraciones detectadas, también funcionan como un indicador biológico cuyas características están influenciadas por la contaminación del aire, el agua, el suelo y la flora.

Para definir que existe contaminación en un territorio determinado por la presencia de material particulado en el aire, se deberán identificar previamente los umbrales de contaminación en ecosistemas cercanos con similares condiciones agroecológicas y donde no exista contaminación ambiental reportada y a partir del hallazgo de contaminantes por encima o por debajo de estos umbrales, es posible afirmar que efectivamente se presenta o no contaminación ambiental por presencia de material particulado en el aire.

Referencias bibliográficas

- Aghamirlou, H. M., Khadem, M., Rahmani, A., Sadeghian, M., Mahvi, A. H., Akbarzadeh, A., & Nazmara, S. (2015). Heavy metals determination in honey samples using inductively coupled plasma-optical emission spectrometry. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 13(1), 1–8. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0189-8>
- Al Naggar, Y. A. (2013). Honey Bees and Their Products as a Bio-Indicator of Environmental. *Mellifera*, 13, 10–20. <https://doi.org/10.1080/10643389.2015.1078220>
- Alvis, E. (2012). *Impacto ambiental generado por el material particulado, sobre la calidad del aire en la zona de influencia de los proyectos carbonífero del departamento del Cesar*. 108. <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/19468/AlvisCamachoElianDavid2012.pdf?sequence=1>
- Argumedo, C. D., & Castillo, J. F. (2016). Caracterización química de material particulado PM10 en la atmósfera de La Guajira, Colombia. *Revista Colombiana de Química*, 45(2), 19–29. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v45n2.56991>
- Azemar, R. (2015). *Biomonitoreo ambiental apícola de la fábrica de cemento ANCAP de Minas*. 1–56. <https://www.ancap.com.uy/innovaportal/file/2243/1/informe-biomonitoreo-con-abejas-2014.pdf>
- Badiou-Bénéteau, A., Benneveau, A., Gélet, F., Delatte, H., Becker, N., Brunet, J. L., Reynaud, B., & Belzunces, L. P. (2013). Honeybee biomarkers as promising tools to monitor environmental quality. *Environment International*, 60, 31–41. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.07.002>
- Bastías, J. M., Jambon, P., Muñoz, O., Manquián, N., Bahamonde, P., & Neira, M. (2013). Honey as a bioindicator of arsenic contamination due to volcanic and mining activities in

Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(2), 147–153.

<https://doi.org/10.4067/S0718-58392013000200010>

Benavides, H. O. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. *Ideam*, 1–102. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>

Bezares, G. M., & Rojo, A. S. (2010). Tesoros en acceso abierto en internet. Un análisis cuantitativo. *Revista Espanola de Documentacion Cientifica*, 33(4), 643–663.

<https://doi.org/10.3989/redc.2010.4.763>

Bittar, D. B., Catelani, T. A., Pezza, L., & Pezza, H. R. (2018). A fast method for the determination of lead in honey samples using stabilizer-free silver nanoparticles. *Spectrochimica Acta - Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 189, 221–226.

<https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.08.032>

Borawska, M. H., Kapała, J., Puación-Jakubik, A., Horembała, J., & Markiewicz-Zukowska, R. (2013). Radioactivity of honeys from poland after the fukushima accident. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 91(5), 489–492.

<https://doi.org/10.1007/s00128-013-1089-1>

Borg, D., & Attard, E. (2020). Honeybees and their products as bioindicators for heavy metal pollution in Malta. *Acta Brasiliensis*, 4(1), 60. <https://doi.org/10.22571/2526-4338282>

Cantor, Y., & López, R. (2013). *Caracterización de contaminantes atmosféricos*. 31, 1–6.

<https://repository.unad.edu.co/discover>

Căuia, E., Siceanu, A., Visan, G. O., Căuia, D., Colta, T., & Spulber, R. A. (2020). Monitoring the field-realistic exposure of honeybee colonies to neonicotinoids by an integrative approach: A case study in Romania. *Diversity*, 12(1). <https://doi.org/10.3390/d12010024>

Costa, A., Veca, M., Barberis, M., Tosti, A., Notaro, G., Nava, S., Lazzari, M., Agazzi, A., & Maria Tangorra, F. (2019). Heavy metals on honeybees indicate their concentration in the

atmosphere. a proof of concept. *Italian Journal of Animal Science*, 18(1), 309–315.

<https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1520052>

Dabour, K., Al Naggar, Y., Masry, S., Naiem, E., & Giesy, J. P. (2019). Cellular alterations in midgut cells of honey bee workers (*Apis mellifera* L.) exposed to sublethal concentrations of CdO or PbO nanoparticles or their binary mixture. *Science of the Total Environment*, 651, 1356–1367. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.311>

Davodpour, R., Sobhanardakani, S., Cheraghi, M., Abdi, N., & Lorestani, B. (2019). Honeybees (*Apis mellifera* L.) as a Potential Bioindicator for Detection of Toxic and Essential Elements in the Environment (Case Study: Markazi Province, Iran). *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 77(3), 344–358. <https://doi.org/10.1007/s00244-019-00634-9>

Dixon, L., Kuster, R., & Rueppell, O. (2014). Reproduction, social behavior, and aging trajectories in honeybee workers. *Age*, 36(1), 89–101. <https://doi.org/10.1007/s11357-013-9546-7>

Dżugan, M., Wesółowska, M., Zaguła, G., Kaczmarek, M., Czernicka, M., & Puchalski, C. (2018). Honeybees (*Apis mellifera*) as a biological barrier for contamination of honey by environmental toxic metals. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6474-0>

EPA. (2018). Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente. *Environmental Protection Agency*, 1–2. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>

Finger, D., Filho, I. K., Torres, Y. R., & Quináia, S. P. (2014). Propolis as an indicator of environmental contamination by metals. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92(3), 259–264. <https://doi.org/10.1007/s00128-014-1199-4>

- Gajger, I. T., Kosanović, M., Oreščanin, V., Kos, S., & Bilandžić, N. (2019). Mineral Content in Honeybee Wax Combs as a Measurement of the Impact of Environmental Factors. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 103(5), 697–703.
<https://doi.org/10.1007/s00128-019-02713-y>
- Giglio, A., Ammendola, A., Battistella, S., Naccarato, A., Pallavicini, A., Simeon, E., Tagarelli, A., & Giulianini, P. G. (2017). *Apis mellifera ligustica*, Spinola 1806 as bioindicator for detecting environmental contamination: a preliminary study of heavy metal pollution in Trieste, Italy. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(1), 659–665.
<https://doi.org/10.1007/s11356-016-7862-z>
- Gizaw, G., Kim, Y. H., Moon, K. H., Choi, J. B., Kim, Y. H., & Park, J. K. (2020). Effect of environmental heavy metals on the expression of detoxification-related genes in honey bee *Apis mellifera*. *Apidologie*, 51(4), 664–674. <https://doi.org/10.1007/s13592-020-00751-8>
- Goretti, E., Pallottini, M., Rossi, R., La Porta, G., Gardi, T., Cenci Goga, B. T., Elia, A. C., Galletti, M., Moroni, B., Petroselli, C., Selvaggi, R., & Cappelletti, D. (2020). Heavy metal bioaccumulation in honey bee matrix, an indicator to assess the contamination level in terrestrial environments. *Environmental Pollution*, 256, 113388.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113388>
- Gorza, G. (2007). *Biomonitoring con Abejas : Estaciones Gemelas con Análisis Simultáneos*. 44.
https://www.apiservices.biz/documents/articulos-es/biomonitoring_con_abejas.pdf
- Gutiérrez, I. (2015). *Empleo de Apis mellífera como bioindicador de la contaminación de metales pesados en el término municipal de Córdoba*. 113.
<https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13253/2016000001367.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gutiérrez, M., Molero, R., Gaju, M., van der Steen, J., Porrini, C., & Ruiz, J. A. (2015).

Assessment of heavy metal pollution in Córdoba (Spain) by biomonitoring foraging honeybee. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(10), 1–15.

<https://doi.org/10.1007/s10661-015-4877-8>

Gutiérrez, M., Molero, R., Gaju, M., van der Steen, J., Porrini, C., & Ruiz, J. A. (2020).

Assessing heavy metal pollution by biomonitoring honeybee nectar in Córdoba (Spain).

Environmental Science and Pollution Research, 27(10), 10436–10448.

<https://doi.org/10.1007/s11356-019-07485-w>

Guzmán-Novoa, E., Benítez, A. C., Espinosa Montaña, L. G., & Novoa, G. G. (2011).

Colonización, impacto y control de las abejas melíferas africanizadas en México.

Veterinaria Mexico, 42(2), 149–178.

<http://www.scielo.org.mx/pdf/vetmex/v42n2/v42n2a5.pdf>

Hladun, K. R., Di, N., Liu, T. X., & Trumble, J. T. (2016). Metal contaminant accumulation in

the hive: Consequences for whole-colony health and brood production in the honey bee

(*Apis mellifera* L.). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35(2), 322–329.

<https://doi.org/10.1002/etc.3273>

Hladun, K. R., Kaftanoglu, O., Parker, D. R., Tran, K. D., & Trumble, J. T. (2013). Effects of

selenium on development, survival, and accumulation in the honeybee (*Apis mellifera* L.).

Environmental Toxicology and Chemistry, 32(11), 2584–2592.

<https://doi.org/10.1002/etc.2357>

Hutton, B., López, F. C., & Moher, D. (2010). La extensión de la declaración PRISMA para

revisiones sistemáticas que incorporan metaanálisis en red: PRISMA-NMA. *GEF Bulletin of*

Biosciences, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jinf.2020.02.020>

Instituto Nacional de Salud. (2019). *INS: 17,549 muertes en Colombia están asociadas a mala*

calidad del agua, del aire y a la exposición a combustibles pesados. 1–3.

<https://www.ins.gov.co/Comunicaciones/Comunicados de prensa/Carga Ambiental en Colombia Prensa INS- 21 de enero de 2019.pdf>

Kargar, N., Matin, G., Matin, A. A., & Buyukisik, H. B. (2017). Biomonitoring, status and source risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using honeybees, pine tree leaves, and propolis. *Chemosphere*, *186*, 140–150.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.127>

Lambert, O., Piroux, M., Puyo, S., Thorin, C., Larhantec, M., Delbac, F., & Pouliquen, H. (2012). Bees, honey and pollen as sentinels for lead environmental contamination. *Environmental Pollution*, *170*, 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.012>

Lambert, O., Veyrand, B., Durand, S., Marchand, P., Bizec, B. Le, Piroux, M., Puyo, S., Thorin, C., Delbac, F., & Pouliquen, H. (2012). Polycyclic aromatic hydrocarbons: Bees, honey and pollen as sentinels for environmental chemical contaminants. *Chemosphere*, *86*(1), 98–104.

<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.09.025>

M, S., & Maleviti E. (2014). Elemental Composition of Honeys from Greece-Possible Use as Environmental Indicators. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, *s8*(January 2011).

<https://doi.org/10.4172/2155-9600.s8-002>

Martínez, A. S., Masciocchi, M., Villacide, J. M., Huerta, G., Daneri, L., Bruchhausen, A., Rozas, G., & Corley, J. C. (2013). Ashes in the air: The effects of volcanic ash emissions on plant-pollinator relationships and possible consequences for apiculture. *Apidologie*, *44*(3),

268–277. <https://doi.org/10.1007/s13592-012-0177-2>

Matin, G., Kargar, N., & Buyukisik, H. B. (2016). Bio-monitoring of cadmium, lead, arsenic and mercury in industrial districts of Izmir, Turkey by using honey bees, propolis and pine tree leaves. *Ecological Engineering*, *90*, 331–335. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.035>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Resolución 2254 de 2017 - Niveles*

calidad del aire. <http://www.minambiente.gov.co/images/normativa/app/resoluciones/96-res-2254-de-2017.pdf>

- Montoya, P., Chamorro, F., Nates, G. (2016). Apis mellifera como polinizador de cultivos en Colombia. *Iniciativa Colombiana de Polinizadores: Abejas ICPA, December*, 95–110. https://www.researchgate.net/publication/311722329_Apis_mellifera_como_polinizador_de_cultivos_en_Colombia
- Morales, E. (2011). ¿Qué es un bioindicador? Aprendiendo a partir del ciclo de indagación guiada con macroinvertebrados bentónicos. *Universidad Nacional de Colombia*, 4. <http://bdigital.unal.edu.co/10195/1/naferedivarmoralessalinas.2011.pdf>
- Negri, I., Mavris, C., Di Prisco, G., Caprio, E., & Pellecchia, M. (2015). Honey bees (*Apis mellifera*, L.) as active samplers of airborne particulate matter. *PLoS ONE*, *10*(7), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132491>
- Nikolić, T. V., Kojić, D., Orčić, S., Batinić, D., Vukašinović, E., Blagojević, D. P., & Purać, J. (2016). The impact of sublethal concentrations of Cu, Pb and Cd on honey bee redox status, superoxide dismutase and catalase in laboratory conditions. *Chemosphere*, *164*, 98–105. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.077>
- Nunes, L. A., de Araújo, E. D., & Marchini, L. C. (2015). Fluctuating asymmetry in *Apis mellifera* (Hymenoptera: Apidae) as bioindicator of anthropogenic environments. *Revista de Biología Tropical*, *63*(3), 673–682. <https://doi.org/10.15517/rbt.v63i3.15869>
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (2018). *Más del 90% de los niños del mundo respiran aire tóxico a diario*. <https://www.who.int/es/news-room/detail/29-10-2018-more-than-90-of-the-world's-children-breathe-toxic-air-every-day>
- Pabón, J., Zea, J., León, G., Hurtado, G., Gonzáles, O. C., & Montealegre, J. (2004). La atmósfera, el tiempo y el clima - parte 2. *El Medio Ambiente En Colombia*, 92–113.

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap3-ii.pdf>

Pellecchia, M., & Negri, I. (2018). Particulate matter collection by honey bees (*Apis mellifera*, L.) near to a cement factory in Italy. *PeerJ*, 2018(7), 1–21.

<https://doi.org/10.7717/peerj.5322>

Perugini, M., Manera, M., Grotta, L., Abete, M. C., Tarasco, R., & Amorena, M. (2011). Heavy metal (Hg, Cr, Cd, and Pb) contamination in urban areas and wildlife reserves: Honeybees as bioindicators. *Biological Trace Element Research*, 140(2), 170–176.

<https://doi.org/10.1007/s12011-010-8688-z>

Placeres, M. R., Olite, F. D., & Toste, M. Á. (2006). La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2).

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223214848008>

Polykretis, P., Delfino, G., Petrocelli, I., Cervo, R., Tanteri, G., Montori, G., Perito, B., Branca, J. J. V., Morucci, G., & Gulisano, M. (2016). Evidence of immunocompetence reduction induced by cadmium exposure in honey bees (*Apis mellifera*). *Environmental Pollution*, 218, 826–834. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.006>

Prato Sánchez, D. F. (2012). *Modelación de la dispersión de material particulado en zona minera del Cesar, Colombia, Usando FLUENT (CFD)*. 79.

<https://repository.ean.edu.co/handle/10882/4607>

Ramírez, O. J. (2012). *Introducción a la problemática y estudio del ambiente*. 1–105.

<https://repository.unad.edu.co/discover>

Ruschioni, S., Riolo, P., Minuz, R. L., Stefano, M., Cannella, M., Porrini, C., & Isidoro, N. (2013). Biomonitoring with honeybees of heavy metals and pesticides in nature reserves of the Marche region (Italy). *Biological Trace Element Research*, 154(2), 226–233.

<https://doi.org/10.1007/s12011-013-9732-6>

- Sadeghi, A., Mozafari, A. A., Bahmani, R., & Shokri, K. (2012). Pszczoły Jako Bioindykatory Skażenia Środowiska w Prowincji Kurdystan, Iran. *Journal of Apicultural Science*, 56(2), 83–88. <https://doi.org/10.2478/v10289-012-0026-6>
- Sager, M. (2017). The Honey as a Bioindicator of the Environment. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 24(4), 583–594. <https://doi.org/10.1515/eces-2017-0038>
- Sari, M. F., Gurkan Ayyildiz, E., & Esen, F. (2020). Determination of polychlorinated biphenyls in honeybee, pollen, and honey samples from urban and semi-urban areas in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(4), 4414–4422. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07013-w>
- Satta, A., Verdinelli, M., Ruiu, L., Buffa, F., Salis, S., Sassu, A., & Floris, I. (2012). Combination of beehive matrices analysis and ant biodiversity to study heavy metal pollution impact in a post-mining area (Sardinia, Italy). *Environmental Science and Pollution Research*, 19(9), 3977–3988. <https://doi.org/10.1007/s11356-012-0921-1>
- Silici, S., Uluozlu, O. D., Tuzen, M., & Soylak, M. (2016). Honeybees and honey as monitors for heavy metal contamination near thermal power plants in Mugla, Turkey. *Toxicology and Industrial Health*, 32(3), 507–516. <https://doi.org/10.1177/0748233713503393>
- Silva, G. J. (2003). *Mitos y realidades del cambio climático*. 125. <https://cods.uniandes.edu.co/mitos-y-realidades-del-cambio-climatico/>
- Silva Garnica, D., Arcos Dorado, A. L., & Gómez Díaz, J. A. (2006). *Guía ambiental apícola*. http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/32938/GUIA_AMBIENTAL_APICOLA_Bogota_-Colombia.pdf?sequence=1
- Skorbiłowicz, E., Skorbiłowicz, M., & Ciesluk, I. (2018). Bees as bioindicators of environmental pollution with metals in an urban area. *Journal of Ecological Engineering*, 19(3), 229–234. <https://doi.org/10.12911/22998993/85738>

- Squadrone, S., Brizio, P., Stella, C., Mantia, M., Pederiva, S., Brusa, F., Mogliotti, P., Garrone, A., & Abete, M. C. (2020). Trace elements and rare earth elements in honeys from the Balkans, Kazakhstan, Italy, South America, and Tanzania. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12646–12657. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07792-7>
- Steen, Jozef J. M. Van der, Kraker, J. de, & Grotenhuis, T. (2015). Assessment of the Potential of Honeybees (&i>Apis mellifera</i> L.) in Biomonitoring of Air Pollution by Cadmium, Lead and Vanadium. *Journal of Environmental Protection*, 06(02), 96–102. <https://doi.org/10.4236/jep.2015.62011>
- Trujillo, A. M. (2011). Como escribir documentos científicos (Parte 3). Artículo de revisión. *Salud En Tabasco*, 17(1–2), 36–40. http://148.202.167.116:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/3335/Como_escribir_documentos_cientificos.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UN. (2013). World population prospects: The 2012 revision. *Population Division of the Department of Economic and Social Affairs*, 94. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:World+Population+Prospects+The+2012+Revision#1>
- van der Steen, J. J.M., Cornelissen, B., Blacquièrre, T., Pijnenburg, J. E. M. L., & Severijnen, M. (2016). Think regionally, act locally: metals in honeybee workers in the Netherlands (surveillance study 2008). *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(8). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5451-8>
- Van Der Steen, Jozef J.M., De Kraker, J., & Grotenhuis, T. (2012). Spatial and temporal variation of metal concentrations in adult honeybees (*Apis mellifera* L.). *Environmental Monitoring and Assessment*, 184(7), 4119–4126. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2248-7>
- Varón, M. G., & Ruiz, P. C. (2017). *Inventarios de emisiones atmosféricas*.

https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/GUÍA_PARA_LA_ELABORACIÓN_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFÉRICAS.pdf

Villegas, B. (2003). Rápida y pertinente búsqueda por internet mediante operadores booleanos. *Revista de La Facultad de Ciencias Pontificia Universidad Javeriana*.

<https://www.redalyc.org/pdf/499/49900808.pdf>

Williams, N. M., Crone, E. E., Roulston, T. H., Minckley, R. L., Packer, L., & Potts, S. G.

(2010). Ecological and life-history traits predict bee species responses to environmental disturbances. *Biological Conservation*, 143(10), 2280–2291.

<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.03.024>

Zarić, N. M., Deljanin, I., Ilijević, K., Stanisavljević, L., Ristić, M., & Gržetić, I. (2018).

Assessment of spatial and temporal variations in trace element concentrations using honeybees (*Apis mellifera*) as bioindicators. *PeerJ*, 2018(7).

<https://doi.org/10.7717/peerj.5197>

Zarić, N. M., Ilijević, K., Stanisavljević, L., & Gržetić, I. (2016). Metal concentrations around

thermal power plants, rural and urban areas using honeybees (*Apis mellifera* L.) as

bioindicators. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(2), 413–

422. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0895-x>

Zarić, Nenad M., Deljanin, I., Ilijević, K., Stanisavljević, L., Ristić, M., & Gržetić, I. (2018).

Honeybees as sentinels of lead pollution: Spatio-temporal variations and source appointment using stable isotopes and Kohonen self-organizing maps. *Science of the Total Environment*,

642, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.040>

Zarić, Nenad M., Ilijević, K., Stanisavljević, L., & Gržetić, I. (2017). Use of honeybees (*Apis*

mellifera L.) as bioindicators for assessment and source appointment of metal pollution.

Environmental Science and Pollution Research, 24(33), 25828–25838.

<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0196-7>

Zarić, Nenad M., Ilijević, K., Stanisavljević, L., & Gržetić, I. (2018). Use of honeybees (*Apis mellifera* L.) as bioindicators of spatial variations and origin determination of metal pollution in Serbia. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 83(6), 773–784.

<https://doi.org/10.2298/JSC171110018Z>

Zhou, X., Taylor, M. P., & Davies, P. J. (2018). Tracing natural and industrial contamination and lead isotopic compositions in an Australian native bee species. *Environmental Pollution*, 242, 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.06.063>

Zhou, X., Taylor, M. P., Davies, P. J., & Prasad, S. (2018). Identifying Sources of Environmental Contamination in European Honey Bees (*Apis mellifera*) Using Trace Elements and Lead Isotopic Compositions. *Environmental Science and Technology*, 52(3), 991–1001.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04084>

Zuarth, C. G., Vallarino, A., Pérez, J. C., & Pfeng, A. M. L. (2014). *Bioindicadores : Guardianes de nuestro futuro Ambiental* (El Colegio). <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Bioindicadores-Guardianes-de-nuestro-futuro-ambiental.pdf>

Recomendaciones

La investigación confirma la hipótesis planteada dado que los hallazgos indican el potencial de las abejas como bioindicador de material particulado en el aire, sin embargo, se recomienda establecer estaciones de monitoreo con abejas en ciudades como Medellín y Bogotá, para correlacionar estos datos con la información presentada por las estaciones fisicoquímicas y apoyar las redes de monitoreo y calidad del aire.

Por otra parte, como resultado de la revisión bibliográfica realizada se propone una ecuación (ecuación 2) para utilizar abejas *Apis mellifera* como bioindicadores de material particulado en el aire, sin embargo, estas variables han sido definidas a partir de la lectura y revisión de 54 artículos científicos utilizados en la investigación y por lo tanto, se recomienda aplicar esta igualdad para la valoración de un caso real con el objetivo de probar su funcionalidad y relación con los fenómenos atmosféricos.