

**Revisión sobre la utilización de bioindicadores para analizar la calidad del aire
en contextos urbanos**

Mary Luz Gutiérrez García

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

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

Tecnología en Saneamiento Ambiental

Bogotá, diciembre 2020

**Revisión sobre la utilización de bioindicadores para analizar la calidad del aire en
contextos urbanos**

Mary Luz Gutiérrez García

Monografía presentada como requisito para optar al título de Tecnología en
Saneamiento Ambiental

Juan Sebastián Chiriví Salomón

Asesor

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

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

Tecnología en Saneamiento Ambiental

Bogotá, diciembre 2020

Nota de Aceptación:

Firma presidente del jurado

Firma del jurado

Bogotá, diciembre de 2020

Dedicatoria

El presente trabajo está dedicado principalmente a Dios por darme la fortaleza y capacidad para salir adelante con esta monografía, en seguida a todas las personas que han sido participes de este proceso, a mi hijo Leo Alejandro quien fue la razón para estar en este tecnólogo y hoy en día culminar este trabajo para recibir el título, a mi esposo quien siempre ha estado apoyándome, a mi padre que está en el cielo pero que fue una de las personas que en algún momento de este proceso me estuvo apoyando, al igual que a mi madre y hermanos, mil gracias. Espero que la información presentada en el presente documento sea útil para quien acceda al mismo.

Agradecimientos

Agradezco a Omar Ramírez Hernández quien fue el tutor que me asesoró en el desarrollo de la propuesta monográfica, también agradezco inmensamente al Líder Nacional de Investigación Juan Sebastián Chiriví por su tiempo y por compartir su conocimiento en la asesoría de la presente monografía, permitiendo así desarrollarla y culminarla con éxito.

Índice

Resumen	13
Abstract	15
Introducción	17
Definición del problema	19
Formulación	20
Justificación	21
Objetivos	24
Bioindicadores de la calidad del aire	25
<i>Concepto de Bioindicadores</i>	25
Definición de concepto de objeto de estudio	25
Características de bioindicadores	27
Visibilidad:	27
Sensibilidad:	29
Eficiencia:	31
Bioindicadores microbiológicos	32

<i>Especies bioindicadoras</i>	36
Agua	37
Macro invertebrados:	38
Poliquetos	40
Mejillón	41
Briozoarios	43
Artrópodos	44
Crustáceos	45
Insectos	46
Moluscos	48
Vertebrados	49
Peces	49
Tiburones	50
Aves:	51
Plantas	52
Algas	53

Zooplanton	55
Virus	56
Suelo	57
Invertebrados	58
Artrópodos	59
Arañas	61
Hormigas	61
Termitas	63
Lombrices	64
Colémbolos	65
Plantas	67
Microbianos	68
Bacterias	70
Micorrizas	71
Micorrizas ectomicorrizas (ECM)	71
Micorrizas arbusculares (MA):	72

Nematodos	73
Protozoos	75
Murciélagos	75
Aire	76
<i>Especies bioindicadoras de calidad del aire</i>	91
Líquenes	91
Abejas	98
Plantas	105
Musgos	109
Clavel del aire	115
Aves	119
Microorganismos	122
Contaminantes atmosféricos que interactúan con bioindicadores	128
<i>Red de monitoreo y biomonitoreo</i>	129
Contaminantes atmosféricos	132
Contaminantes primarios:	132

Contaminantes secundarios:	139
Evidencias de biomonitoreo de contaminación atmosférica	142
Estudios con líquenes	142
Estudios con abejas	168
Estudios con plantas	177
Estudios con musgos	184
Estudios con clavel de aire	193
Estudios con aves	198
Estudios con microorganismos	205
Ventajas y desventajas	213
<i>Propuesta de valor</i>	218
Bibliografía	223

Indice de tablas

Tabla 1. Organismos y especies bioindicadores de la calidad del aire.....80

Tabla 2. Ventajas y desventajas de los bioindicadores de la calidad del aire.....213

Índice de figuras

Figura 1. Características de los bioindicadores.....	27
Figura 2. Especies bioindicadoras.....	37
Figura 3. Contaminación atmosférica.....	141
Figura 4. Líquenes.....	142
Figura 5. Abejas.....	168
Figura 6. Plantas.....	177
Figura 7. Musgos.....	184
Figura 8. Clavel de aire.....	193
Figura 9. Aves.....	198
Figura 10. Microorganismos.....	205

Resumen

Esta monografía tiene como fin identificar los principales avances o estudios desarrollados a lo largo del tiempo haciendo uso de bioindicadores para el análisis de la calidad del aire en ambientes urbanos, reconociendo las especies más utilizadas por su sensibilidad o tolerancia, y así mismo, resaltando sus ventajas y desventajas; dado esto, es posible demostrar que se puede evaluar la calidad atmosférica de manera confiable y económica; teniendo en cuenta que muchas ciudades a nivel mundial son focos de contaminación por las elevadas emisiones de fuentes móviles e industrias con fuentes fijas que contribuyen en la contaminación.

Los estudios citados fueron e realizados por estudiantes, profesores y científicos que evaluaron la calidad del aire de ciertas zonas urbanas afectadas por la contaminación atmosférica, donde demostraron su sensibilidad y eficiencia; algunos de estos lugares nunca han tenido la oportunidad de conocer el estado real en que se encuentra la calidad atmosférica, otros lugares tienen red de monitoreo, pero quieren implementar el biomonitoreo para comparar resultados y ver los efectos directamente en seres vivos, y en otras partes sencillamente hace mucho tiempo que evaluaron la calidad del aire y quieren conocer la evolución de la misma.

El uso de bioindicadores es un éxito en cada uno de los estudios aplicados, logrando conocer el estado de contaminación de ambientes urbanos por medio de los efectos y contaminantes acumulados en algunos organismos vivos catalogados como bioindicadores, obteniendo como resultado un biomonitoreo de calidad del aire a bajo costo; una vez se conoce el estado de contaminación es posible exigir a las autoridades

garantice los derechos fundamentales como lo es el derecho a gozar de un ambiente sano establecido en el artículo 79 de la constitución política de Colombia, por ende implementar medidas de mitigación es necesario para mejorar la calidad del aire, además, con el uso de bioindicadores es posible ver los resultados o avances que se van obteniendo con las estrategias implementadas para el mejoramiento de la calidad del aire.

Palabras clave: bioindicador, calidad del aire, contaminación atmosférica, estudio, monitoreo del aire.

Abstract

The purpose of this monograph is to identify the main advances and to review developed studies over time about making use of bioindicators for the analysis of air quality in urban environments.

The identification of most used species due to their sensitivity or tolerance and the recognition of their advantages and disadvantages were pillar for the construction of this document, given this work, atmospheric quality can be measured reliably and economically by bioindicators; taking into account that many cities worldwide are sources of pollution due to the high emissions from mobile and industrial sources of pollution.

The studies cited were and carried out by students, professors, and scientists who evaluated the air quality of urban areas through biological indicators, which demonstrated their sensitivity and efficiency; occasionally, these places could be compared with air monitoring network, and elsewhere they have simply evaluated air quality for a long time and want to know how it is evolving.

The use of bioindicators was a success in each of the applied studies because they allow us to know the state of pollution in urban environments. a determination of air quality at low cost can be obtained through the effects and accumulated pollutants in some living organisms classified as bioindicators, resulting in low-cost air quality biomonitoring. Once the state of contamination is known, it is possible to demand that the authorities guarantee fundamental rights such as the right to enjoy a healthy

environment established in article 79 of the Colombian political constitution, therefore implementing mitigation measures is necessary to improve air quality, in addition, with the use of bioindicators it is possible to see the results or advances that are being obtained with the strategies implemented to improve air quality.

Key words: bioindicator, air quality, air pollution, study, air monitoring.

Introducción

La presente monografía se refiere al tema de los bioindicadores, siendo estos organismos vivos que indican la presencia de contaminación o de alguna alteración en el ecosistema derivada del estrés ambiental, razón por la cual estos seres tienen la capacidad de servir como biomonitores de la calidad ambiental, de forma sencilla y económica. En algunas partes del mundo existen ya varios estudios pero en la gran mayoría de lugares no tienen conocimiento sobre los bioindicadores, razón por la cual falta conocimiento sobre el tema. Este es el motivo por el cual se lleva a cabo esta monografía con la recopilación de estudios llevados a cabo a nivel nacional y extranjero, para así dar a conocer que su uso es un éxito y han sido previamente estudiados y probados.

La característica principal de este tipo de bioindicadores es que son excelentes instrumentos biológicos que evalúan completos sistemas ecológicos. Por otra parte, para analizar esta gran herramienta que evalúa la calidad del aire es necesario mencionar la problemática existente, ya que a nivel mundial son contadas las ciudades o zonas contaminadas que cuentan con una red de monitoreo, teniendo en cuenta los costos económicos que representa implementar una red. Esto, conlleva a que muchos sitios urbanos tengan la oportunidad de conocer su grado de contaminación y los graves efectos de salud que genera sobre los seres vivos con el uso de bioindicadores.

En la presente monografía se abordará de manera muy resumida algunos bioindicadores de la calidad del agua y suelo con la motivación de mostrar las bases de la bioindicación, además se profundizará en el tema principal que son los

bioindicadores de la calidad del aire donde se describe su taxonomía, ecología, biología y efecto bioindicador, junto a una serie de estudios donde evaluaron y comprobaron su eficiencia

Definición del problema

Según el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2015) de la República de Colombia la exposición de contaminación atmosférica equivale al 4 factor de riesgo de muerte a nivel mundial con el aumento de enfermedades pulmonares agudas, crónicas y cáncer, junto a enfermedades cardiovasculares. En Colombia según el instituto nacional de salud para el año 2019 hay 17,549 muertes que están relacionadas con la mala calidad del aire, exposición a combustibles pesados y mala calidad del agua.

Las personas en el diario vivir inhalan una mezcla de partículas líquidas y sólidas, sustancias orgánicas, gases suspendidos en el aire tales como el monóxido de carbono, dióxido de azufre y ozono, además de otras partículas conocidas técnicamente como PM_{10} y $PM_{2,5}$, siendo estas muy nocivas, por lo que pueden penetrar fácilmente el aparato respiratorio e incluso llegar hasta el torrente sanguíneo y la placenta. En el país, aproximadamente un 80% de la contaminación del aire proviene de fuentes móviles (camiones, volquetas, motos, buses y taxis) y el 20% restante de fuentes fijas como chimeneas, industrias, quemas, incendios forestales y minería (Pardo, 2019).

Hay bastante información sobre bioindicadores (líquenes, por ejemplo) aplicados a zonas específicas en diversos lugares del mundo para analizar la calidad del aire urbano, sin embargo, es interesante hacer una revisión bibliográfica en donde se analicen las especies utilizadas y los aportes que han generado estos bioindicadores donde han sido utilizados para evaluar y monitorear de forma preliminar áreas contaminadas, analizando de esta manera sus avances, ventajas y desventajas.

Formulación

Teniendo en cuenta que hay un vacío de información con respecto al uso de bioindicadores como alternativa para evaluar la calidad del aire, lo que se pretende es resaltar o rescatar estudios ya realizados en diversas partes del mundo, teniendo en cuenta que las cifras en Colombia derivadas de la degradación ambiental según el DPN (2015) corresponde a 16.6 billones de pesos, donde la mala calidad del aire fue la que mayor influencia tuvo en este resultado; esto indica que empezando por nuestro país no se cuenta con un buen monitoreo de aire, ni tampoco con medidas de mitigación eficientes, por lo tanto, es importante resaltar y dar a conocer los bioindicadores como una excelente alternativa para evaluar y monitorear la calidad del aire.

Esta monografía plantea la siguiente pregunta: ¿Qué bioindicadores se han utilizado para medir la calidad del aire en ambientes urbanos y qué ventajas/desventajas se han reportado?

Justificación

Según indagaciones del Centro de Investigación en Epidemiología Ambiental de Barcelona (CREAL) una exposición a NO₂, procedente especialmente del tráfico urbano, en las primeras fases del embarazo se puede asociar con un menor crecimiento del feto y a su vez conlleva a un bajo peso (Instituto de Salud Global de Barcelona, 2017). La Organización Mundial de la Salud (OMS) (2018) informa que la exposición de aire contaminado da lugar a que los bebés nazcan prematuros, así mismo, otro estudio sobre el efecto de la contaminación del aire en el feto de mujeres embarazadas ha confirmado que su exposición contribuye a una menor capacidad cognitiva entre otras alteraciones en el cerebro; también advierte que un 93% de los menores de 15 años en el mundo (1.800 millones de niños) respiran a diario un aire tan contaminado que les perjudica su salud y crecimiento, donde las infecciones respiratorias se han consolidado como la principal causa tanto en niños como en adultos. Los niños que han estado expuestos a altos niveles de contaminación corren más riesgo de contraer afecciones crónicas, como las enfermedades cardiovasculares, asma y cáncer en etapas posteriores de su vida. Los niños y ancianos son los más vulnerables que viven expuestos a la contaminación atmosférica, según estudio publicado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEE) (Vargas *et al.*, 2008).

Según el Ministerio de Salud y Protección Social (MINSALUD) en Estados Unidos, del año 2007 al 2009 encontraron costos directos de personal médico de la salud de 4.528 dólares por persona/año y en otro estudio en los países bajos hallaron costos indirectos (generados por pérdida laboral) de 3.754 dólares por persona/año. En costos indirectos, los días de trabajo o colegio perdidos también afectan, llegando a un valor de 1.274 dólares persona/año (MINSALUD, 2016. p.32)

Los equipos automáticos que se usan actualmente para medir la calidad del aire presentan un gran costo, lo que ha limitado la medición en diferentes zonas de las ciudades. Es por ello que hay centros urbanos que no monitorean la calidad de su aire o presentan tan solo 1 o 2 puntos de medición. Esto ha hecho que en los últimos años se utilicen bioindicadores porque son económicos, confiables y permiten la medición en diversos lugares de las ciudades. Diferentes estudios han avanzado en el uso de bioindicadores y han llegado a buenos resultados. Algunos de los estudios sobre este tema son:

- Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de líquenes en la provincia de San Luis, Argentina (Santoni *et al*, 2006).
- Evaluación de la calidad del aire en 8 zonas de la ciudad de Bogotá utilizando los líquenes como bioindicadores (Figuroa *et al*, 2015).
- Plantas como bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia en las ciudades ciudad La Paz y El Alto (Anze *et al*, 2015).

- Líquenes y claveles del aire como bioindicadores de contaminación atmosférica por metales pesados en el microcentro santafesino (Ghirardi *et al.*, 2010).

Por lo tanto, esta monografía aborda asuntos de interés actual (calidad del aire y bioindicadores). Los cuales han tenido un abordaje a nivel internacional.

Objetivos

Objetivo general

Identificar los principales avances obtenidos en la utilización de bioindicadores para el análisis de la calidad del aire en ambientes urbanos.

Objetivos específicos

- Identificar las principales especies utilizadas como bioindicadores.
- Reconocer los principales contaminantes atmosféricos que interactúan con los bioindicadores.
- Analizar las ventajas y desventajas del uso de bioindicadores en contextos urbanos.

Revisión bibliográfica sobre la utilización de bioindicadores para analizar la calidad del aire en contextos urbanos

Bioindicadores de la calidad del aire

Concepto de Bioindicadores

Definición de concepto de objeto de estudio

Un organismo es considerado como bioindicador cuando presenta variaciones a causa de algún elemento extraño en el ambiente, un ejemplo claro son los contaminantes atmosféricos que cambian las funciones vitales y composición química de las especies bioindicadoras, lo que permite obtener conclusiones sobre el estado del medio ambiente a diferentes grados de alteración; otra forma de describir a un bioindicador es toda especie que presente alguna obstrucción, reacción o daño identificable ante los grados de alteración generados a partir de la contaminación del aire (Lijteroff *et al*, 2009). Según Puig (2009), los bioindicadores son organismos muy sensibles a su hábitat y tienen la capacidad de sobrevivir a límites máximos, crecer en intermedios y reproducirse en límites muy estrechos, es decir, cuando sus límites de tolerancia son estrechos, mayor será su eficiencia como indicador ecológico. De modo

similar, son organismos o comunidades de organismos, ya sean de tipo vegetal, hongo o animal, que reaccionan con el medio ambiente cambiando sus funciones vitales y/o su composición química, lo que permite obtener conclusiones sobre el estado del medio ambiente (Silveridilla, 2012). No obstante, para Montesanti (2015) los bioindicadores son indicadores biológicos de la calidad de un entorno y cambios sufridos con el pasar del tiempo, a causa antropogénica o natural, midiendo así los impactos de contaminación generados normalmente por actividad del hombre; estos deben tener buena capacidad para suministrar una buena respuesta y, así mismo, responder de forma proporcional al grado de contaminación existente. En cambio, Mares (2017) en su trabajo de grado hace referencia al término bioindicador como todo lo concerniente a la detección de respuestas bióticas al estrés ambiental.

Ya Para finalizar el concepto de bioindicador que será utilizado en esta monografía son las ideas y conceptos planteados por Silveridilla (2012) y García *et al* (2014), con algunas adaptaciones de acorde con la revisión anterior de concepto.

Son organismos o comunidades de organismos vivos, que responden a estímulos como la presencia de algún compuesto, contaminante o estrés ambiental, sobre su estructura física, metabólica o de población provocando diferentes reacciones o cambios en sus funciones vitales o en su composición química; otros van acumulando toxinas, lo que permite obtener conclusiones sobre el estado del medio ambiente.

Características de bioindicadores

Así conforme, existen algunas características que se extienden de esta definición y que son objeto de observación y análisis en cada uno de los capítulos de esta monografía.

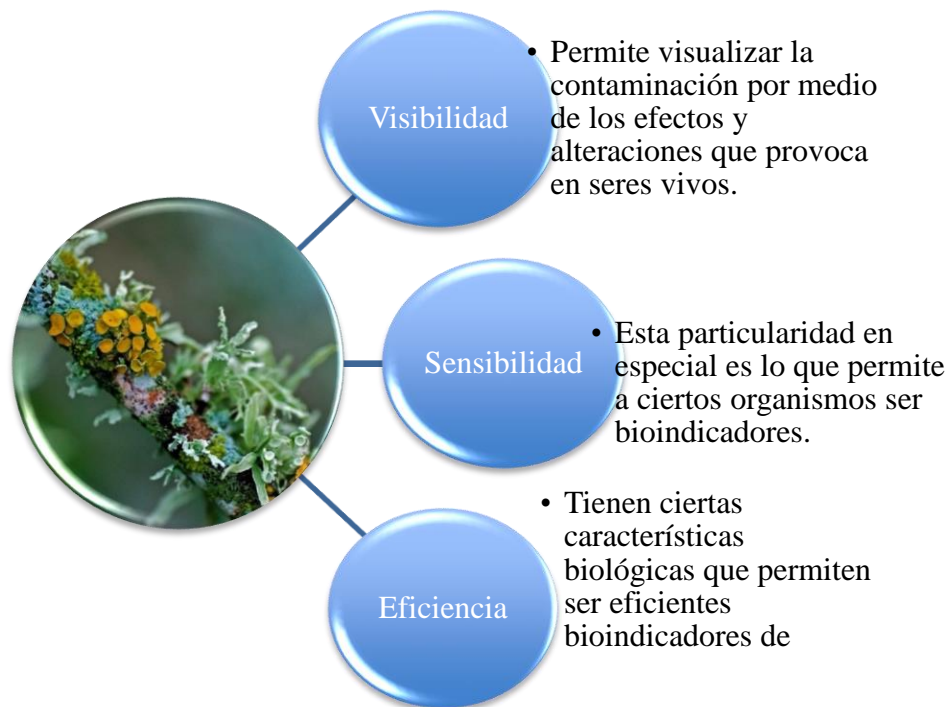


Figura 1. Principales características de los bioindicadores.

Visibilidad:

Teniendo en cuenta que la contaminación atmosférica es poco visible, el uso de seres vivos como los bioindicadores es de gran ayuda para detectarla, por sus reacciones que presentan es posible observar las alteraciones que pueden presentar con

la presencia de ciertos contaminantes en su medio ambiente, por ejemplo, los cambios en su forma, crecimiento, desaparición, presencia de sombras o pigmentos, palidez por zonas, etc., algunos cambios en algunos bioindicadores son a corto plazo y otros a largo plazo como es el caso de los líquenes, lo que indica que la presencia de líquenes en un determinado sitio es porque existe pureza del aire en un periodo de tiempo largo, aunque si hablamos a nivel micro si es posible observar cambios en pequeños periodos de tiempo (Oller, 2017).

Varios estudios con bioindicadores han evaluado el tipo de contaminación, donde ha sido visible por el método cualitativo y cuantitativo, esto implica estar observando lesiones o deformaciones del talo, cambios en la estructura y la diversificación en procesos fisiológicos como la absorción. Esto teniendo en cuenta que los bioindicadores son seres bioacumuladores, con salida de electrolitos, tienen cierta cantidad de pigmentos, fluorescencia y además presentan abundancia o disminución de la especie o en casos más severos de contaminación las especies muy sensibles se extinguen (Mares, 2017, p. 10-11).

Un estudio realizado en Bolivia haciendo uso de plantas como bioindicadores para la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia, estos organismos responden de muchas y diferentes formas a factores externos como contaminantes atmosféricos, las cuales son totalmente visibles ante respuestas a daños provocados: clorosis, necrosis, brillo plateado, (Anze *et al*, 2007).

Cuando existen áreas contaminadas en el caso de los líquenes, el fitobionte es el primero en exponer daños y si la contaminación continúa, los talos también empiezan a

experimentar daños perceptibles hasta producir la muerte de los mismos, siendo muy posible su desaparición en pocos meses o años. Esto indica que el uso de bioindicadores, permite ver las manifestaciones de cada ser con el pasar del tiempo y así determinar los cambios de la calidad del aire en determinada zona (Fernández *et al*, 2006).

Sensibilidad:

Algunas especies son intolerantes o muy sensibles a determinados lugares con una condición ambiental alterada, por lo cual son incapaces de adaptarse, viéndose afectada su condición ecológica o genética, de tal modo que su desaparición es un indicador del problema. Existen muchos organismos como animales (vertebrados e invertebrados), briofitas, algas, plantas vasculares, hongos, que pueden ser utilizados como bioindicadores en suelo, agua y aire; por ejemplo los líquenes son la mejor muestra de sensibilidad ante la mala calidad del aire, los líquenes absorben altas concentraciones de bisulfatos y sulfatos, esto inhabilita su organismo para cumplir sus funciones primordiales como la fijación de nitrógeno, respirar, fotosíntesis, de esta manera poco a poco el talo empieza a sufrir lesiones hasta que finalmente desaparece (Lijteroff *et al*, 2009). A sí mismo, Lijteroff menciona “Un nivel anual de 8–30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de sulfuro produce la deformación o la muerte de especies liquénicas sensibles”.

Para escoger un organismo como bioindicador es importante tener en cuenta las condiciones físicas, químicas y biológicas de cada organismo, ya que de estas características depende conocer el nivel de tolerancia que puede resistir cada

organismo, de ahí también se deriva los grados de sensibilidad y asimismo, determina el éxito que puede tener como bioindicador (García *et al*, 2017).

García *et al* (2017) menciona que según Holt y Miller (2011) para seleccionar a un indicador se debe tener en cuenta las especies presentes en la zona que se va a evaluar y que tenga algunas características como: a) el indicador debe dar respuestas medibles, es decir, sensible pero que no desaparezca ante las alteraciones que se puedan presentar en el ambiente; b) debe ser abundante y común, tener alta distribución en el área de estudio; c) tener estabilidad ante los cambios climáticos; d) ser bien estudiado, debe haber buen material de estudio sobre su comportamiento e historia del organismo y e) que sea fácil y económico de monitorear.

Desde ya hace muchos años se han venido publicando artículos científicos donde realizan diversos estudios con bioindicadores, especialmente sobre líquenes y con el pasar del tiempo se ha venido demostrando su gran sensibilidad a contaminantes atmosféricos, como los metales pesados SO₂, NO_x, O₃, entre otros contaminantes; son muy conocidos por su habilidad indicadora precisamente por ser altamente sensibles, a su vez existen varias especies que pueden vivir décadas expuestas a contaminantes que con el transcurso del tiempo se van acumulando en sus tejidos, por ende son bioacumuladores debido a la insuficiencia de estomas y cutícula, lo que provoca la absorción de contaminantes en toda la superficie del talo. Cabe destacar que no todas las especies de líquenes tienen una misma sensibilidad a contaminantes atmosféricos. Cada especie presenta distinta sensibilidad a cierto contaminante, las que presentan tolerancia tienen la capacidad de sobrevivir y las muy sensibles a determinado

contaminante pueden desaparecer. Por tanto, este tipo de sensibilidades que se pueden presentar es lo que permite analizar los efectos existentes de contaminación atmosférica en ciertas zonas (Mares, 2017). En el siglo XIX la Liquenología obtuvo un buen avance en su desarrollo, es allí donde hace presencia el finlandés William Nylander siendo uno de los más destacados en la investigación de la Liquenología, llevó a cabo parte de sus estudios en el jardín de Luxemburgo situado en París, allí Nylander se da cuenta de la sensibilidad que tienen los líquenes, continúa realizando estudios y finalmente plantean la opción de ser utilizados como bioindicadores ecológicos de la contaminación del aire (Carballal *et al*, 2006).

En la ciudad de Tingo María Perú se llevó a cabo un estudio haciendo uso de líquenes como bioindicadores de la calidad del aire, donde la especie *Chrysothrix candelaris* demostró ser muy sensible, ya que en áreas de mayor flujo vehicular existen muy pocas especies y en áreas de menor emisión y flujo vehicular se presentó en mayor cantidad (Quispe *et al*, 2015).

Eficiencia:

Según estudios realizados por Ambrosio y Bringas (2017) en tres zonas de Cajamarca localizado en el país de Perú, evaluaron líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica proveniente de las fuentes móviles y según los resultados que arrojaron se concluyó que las especies liquénicas son bioindicadores de la calidad del aire eficientes. Dicha eficiencia depende de sus características biológicas: no tienen raíces ni sistemas de conducción, tampoco tienen estructuras protectoras, por lo que

absorben nutrientes de su beneficio. Así mismo, partículas y gases de los contaminantes.

En un estudio realizado en Tingo María, Perú, estudiantes utilizaron el método de cartografía de líquenes para analizar la contaminación atmosférica en zonas de mayor y menor frecuencia vehicular, el estudio se llevó a cabo durante 6 meses haciendo repeticiones del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) y la tasa de flujo vehicular. Identificaron especies muy tolerantes como *Physcia lopezii* y *Hyperphyscia pyvithrocardia*, estas dos especies alcanzaron una frecuencia de 9 y una especie con mayor sensibilidad llamada *Chrysothrix candelaris* que alcanzó una frecuencia máxima de 4. Se demostró la eficiencia que tiene los líquenes como indicadores biológicos de contaminantes atmosféricos, obteniendo como resultado que, a mayor emisión de contaminantes vehiculares, la especie más sensible tiene mínima presencia en la zona; mientras que en zonas con poco flujo vehicular y por ende menor contaminación su presencia aumenta considerablemente (Quispe *et al*, 2015).

Bioindicadores microbiológicos

La salud de personas que permanecen en edificaciones cerradas se ha visto directamente relacionada con la aparición de microorganismos en su interior. Las bacterias son transportadas por el aire y de esta manera van afectando la calidad del aire; este problema se ve más que todo en lugares como hospitales, laboratorios,

oficinas de trabajo, industrias manufactureras y farmacéuticas, bibliotecas, museos, viviendas, etc, (Romero *et al.*, 2016).

La contaminación microbiana en edificaciones o lugares cerrados genera enfermedades de tipo respiratorio y alergias aumentando así los problemas de salud, muchas veces lo más común es encontrar en estos ambientes el Síndrome del edificio enfermo (SEE), que consiste en muchos síntomas de origen multifactorial y temporal, afectando a más de un 20% de personas en el edificio, síntomas que mejoran o desaparecen cuando el afectado abandona el edificio (Rey *et al.*, 2006). Conocido como un conjunto de síntomas diversos de origen multifactorial y de relación temporal positiva, experimentados por más de un 20 % de los ocupantes de edificios no industriales, que mejoran e incluso pueden llegar a desaparecer cuando el afectado deja el edificio. Este síndrome se ha presentado durante décadas y existe evidencia de que en su presencia hay contaminación biológica, debido a que la condición ambiental se presta para la proliferación de microorganismos biológicos; tanto así, que en 1984 la OMS (Organización Mundial de la Salud) determinó que más del 30% de edificios tenían este problema, sin embargo, son muy limitados los estudios y estadísticas a nivel mundial sobre este tema (Daza *et al.*, 2015).

La contaminación del aire interior es un tema que ha venido preocupando a científicos desde los años 80, ya que los efectos en la salud provocados por la calidad del aire al interior de sitios cerrados como edificios produce en sus residentes o trabajadores sensación de cansancio, cefaleas, irritación mucosa y en otros casos desarrollar enfermedades como la rinitis, bronquitis y asma; estos son síntomas

generados por la mala calidad del aire al interior del edificio (Daza *et al.*, 2015). Sin embargo, en la actualidad y gracias al avance tecnológico han llevado a estos espacios cerrados instrumentos y materiales que brindan espacios más cómodos, pero lo que no se tiene en cuenta es que estos también facilitan la aparición de contaminantes como Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) de diferentes fuentes tales como la calefacción, barnices, disolventes, tableros de yeso que emiten bastante cantidad de sustancias químicas como acetonas, nonadal y formaldehidos lo que afectan directamente la calidad del aire causando contaminación química del aire interior, provocando la existencia de partículas biológicas como virus, bacterias, hongos, toxinas, esporas. Entre muchos otros microorganismos que se dispersan por el aire afectando a personas que se encuentran en este lugar por medio de la respiración que se lleva a cabo en un promedio de 14 metros cúbicos de aire por día; además de afectar la salud humana contribuyen también con el deterioro de las infraestructuras; al igual que la humedad existente ya sea en techos, paredes, etc., ayuda a promover hongos tipo *Penicillium* y *Aspergillus* (Fernández *et al.*, 2012).

En el laboratorio de microbiología de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, se llevó a cabo un estudio para determinar la calidad bacteriológica del aire y de esta manera establecer la existencia de riesgo para la salud de las personas que se encuentran expuestas ante la presencia de estos microorganismos, tuvieron en cuenta la técnica de sedimentación para tomar las muestras en el aire, hicieron caracterización microscópica y macroscópica de las colonias y después de hacer aislamientos selectivos siguieron con la identificación por medio de BD BBL Cristal. Allí obtuvieron mayor cantidad de bacterias Gram positivas que de Gram negativas y

encontraron bacterias de géneros *Acinetobacter*, *Shigella*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*, *Leuconostoc*, *Citrobacter*, *Bacillus*, *Corynebacterium*, *Pseudomonas*, *Yersinia*, *Serratia* y *Klebsiella*, según resultados estas bacterias no constituyen gran riesgo para la salud, pero si es importante y necesario disminuir o desaparecer esta carga elevada bacteriana para así evitar posibles afecciones generales a la salud de las personas expuestas en el laboratorio (Romero *et al.*, 2016).

Ahora un caso de contaminación por microorganismos en lugares abiertos, esta vez un estudio que se llevó a cabo en la localidad de Puente Aranda en Bogotá, esta localidad es muy reconocida por su actividad industrial, al igual que el flujo vehicular, y así mismo, crece la tasa de enfermedades respiratorias especialmente en niños y ancianos, debido a la contaminación tanto por fuentes fijas como móviles. Por tal razón evaluaron la existencia de microorganismos en el aire y su relación con el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), teniendo en cuenta factores meteorológicos y la concentración de gases como O₃ y NO_x; hicieron muestreos, análisis microbiológico, técnicas de cultivo, técnicas de asepsia, recuento de unidad formadora de colonias (UFC), aislamiento de microorganismos y por último identificación de organismos, donde identificaron microorganismos patógenos como, oportunistas y hongos generadores de micotoxinas. Algunas especies de los resultados son: *Corynebacterium diphtheria* causante de difteria, *Klebsiella pneumoniae* causante de Neumonía primaria, infecciones de heridas y de las vías urinarias, bacteremia y meningitis; *Pseudomonas aeruginosa* causante de neumonía y meningitis, *Staphylococcus aureus* causante de neumonía, meningitis y endocarditis; *Streptococcus pyogenes* causante de faringitis, neumonía y endocarditis; *Streptococcus pneumoniae* causante de neumonía

lobular, sinusitis, meningitis y septicemia; *Aspergillus fumigatus* hongo causante de aspergillosis broncopulmonar y ontomicosis (Cruz *et al*, 2006).

Especies bioindicadoras

En el presente capítulo se relacionan los diversos organismos vivos que detectan la contaminación en cada uno de los recursos más importantes en el planeta tierra, tales como el agua, suelo y aire, contaminación ocasionada por actividades antropogénicas que día por día generan mayor desestabilidad y alteración ambiental, estos seres gracias a su sensibilidad y otros a su tolerancia frente a la contaminación y estrés medio ambiental, se convierten en bioindicadores que contribuyen en la evaluación de la calidad de estos tres recursos tan preciados. Cada una de estas especies bioindicadoras se acoplan a cierto hábitat por lo que no todos pueden permanecer en las mismas condiciones ambientales, otros como es el caso de las aves si tienen la capacidad de acoplarse a muchos hábitats, lo que permite ser empleadas como bioindicadores de amplias zonas o varias áreas de estudio a la vez (Villegas *et al.*, 2008). Se incluyen casos de estudio relacionados con el monitoreo de zonas haciendo uso de artrópodos, vertebrados, plantas, aves, etc., en Colombia y otros países, demostrando así la aplicación de estos organismos en el monitoreo, evaluación y análisis de la contaminación en el aire.



Figura 2. Especies bioindicadoras de aire.

Agua

El ecosistema acuático está sometido permanentemente a la presencia del hombre, donde su influencia no es la más conveniente ya que trae consigo graves consecuencias que muchas veces son irreversibles, de esta manera es como poco a poco se va alterando el ciclo natural de los cuerpos de agua (Velázquez, 2004).

El uso de bioindicadores acuáticos es una herramienta que complementa al método tradicional de análisis microbiológico y fisicoquímico para conocer la calidad del agua y su aplicabilidad consiste en identificar y cuantificar seres vivos teniendo en cuenta su diversidad y ajustados a ciertos intervalos que estiman la calidad del agua (Storaci *et al.*, 2013). Un bioindicador acuático para que sea efectivo debe ser fácil en

el proceso de cuantificación y colección, ser muy sensible a la más mínima contaminación y tener buen rango geográfico (Fernández *et al.*, 2015).

Macro invertebrados:

En la actualidad los macro invertebrados acuáticos son los organismos más utilizados para el monitoreo de ríos y lagunas afectados por la mano humana (Ramos *et al.*, 2013), son aquellos seres que viven en el fondo de quebradas, ríos, lagos, etc., su tamaño oscila entre 0.5 mm y 5.0 mm, por lo que son fácil de observar (Roldán, 2016), su cuerpo está cubierto de una especie de cera lo que permite que sean impermeables (Roldán, 2012), se reproducen en grandes cantidades y se alimentan de otros animales en descomposición, sangre de otros animales, elementos del suelo nutritivos, restos de plantas y algas también de otros invertebrados; algunas ventajas que tienen es que facilitan evaluar los efectos a largo plazo (Domínguez *et al.*, 2010, son muy diversos, su recolección es sencilla, algunos tienen ciclos de vida cortos por tal razón dan a conocer con mayor rapidez las alteraciones del ecosistema, otras especies en cambio tienen su ciclo de vida largo por ende guardan los efectos de contaminación en el tiempo, se alimentan y viven en sedimentos, pero por su sensibilidad reaccionan a factores contaminan los sedimentos y el agua, también tienen sus desventajas que no afectan tanto y es que son heterogéneos (Gamboa *et al.*, 2008).

Gauffin y Tarzwell en 1952 proponen los macro invertebrados como bioindicadores de contaminación, luego de que Kolenati y Cohn encontraran cierta

relación de algunos macro invertebrados con la calidad del aire (Roldán, 2016). Por otra parte, desde el inicio del siglo XX hasta el día de hoy los macro invertebrados han sido un grupo de especies estudiadas para evaluar los ecosistemas acuáticos y en políticas medioambientales han sido definidos como el conjunto de organismos más importantes para estudiar el estado ecológico de ecosistemas acuáticos utilizados para monitorear la calidad del agua, ya que ellos reflejan la calidad del cuerpo de agua en que se encuentran, sirviendo como bioindicadores (Pérez, 2016); (Puey, 2010). por otro lado, el ciclo biológico de estas especies es de gran importancia para poder evaluar si la contaminación es espacial o temporal y a partir de esta especie de macro invertebrados también han logrado desarrollar líneas metodológicas utilizando índices multimétricos teniendo en cuenta la tolerancia de cada especie a la contaminación (Puey, 2010). Existen especies sensibles y tolerantes pero lo ideal para ser bioindicadores es que sean sensibles, claro está sin dejar de lado las tolerantes ya que estas también son importantes dentro de los estudios, por ejemplo las macrófitas y algas son altamente sensibles y se conoce como indicadores exactos de materia orgánica, eutrofización y acidificación (Giacometti *et al.*, 2015).

En Colombia la comunidad de macro invertebrados mayor estudiada es la entomofauna especialmente especies de los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera bien conocidas por su ecología, taxonomía y uso como bioindicadores de la calidad del agua (Roldán, 2016). Tradicionalmente se ha venido evaluando la calidad del agua basada en el análisis fisicoquímico y de bacteriología, pero en los últimos tiempos varios países han venido adoptando el uso de macro invertebrados para analizar la calidad de ecosistemas acuáticos.

Poliquetos

Los poliquetos son gusanos segmentados y generalmente se encuentran en el mar, hay gran variedad de especies y cada especie es muy abundante, los sedimentos que tienen los gusanos atrapan y acumulan contaminantes, su abundancia, riqueza de especies, formas de alimentación y gran permanencia en el bentos hace que sean excelentes bioindicadores de perturbación ambiental en sistemas acuáticos; los poliquetos son muy importante para la comunidad bentónica ya que además de ser abundante reutiliza los sedimentos marinos y compacta la materia orgánica, algunas variables a tener en cuenta son la cantidad de oxígeno disuelto, la profundidad y temperatura; los poliquetos tolerantes tienen la capacidad de soportar pequeñas cantidades de algunos contaminantes como Pb, V, Al, Zn, CN (Fernández *et al.*, 2015). Son utilizados en programas de monitoreo y vigilancia ambiental en diversos sitios a nivel mundial, ocupando un buen rango en estudios para evaluar alteraciones ambientales especialmente en bahías, también han sido usados en estudios de ecotoxicología en larvas o con cepas de adultos y como bioindicadores de la acumulación de contaminantes en áreas submarinas, de esta manera es posible conocer el estado ambiental con estas comunidades y de la presencia o ausencia de ciertas especies es posible determinar la salud ambiental existente (Cañete *et al.*, 2000).

Se han realizado diferentes estudios que exploran a estos organismos como bioindicadores, tales como:

En la bahía Petacalco en la ciudad de Guerrero, México se estudió la respuesta que tiene los poliquetos ante la condición y variabilidad de las zonas costeras (Rodríguez, 2004).

En el puerto de Mar de plata situado en Argentina se llevó a cabo un estudio con poliquetos como bioindicadores de la calidad del agua donde se pudo observar que tienen potencial como bioindicadores de la contaminación en este puerto de Mar de plata (Rivero *et al.*, 2005).

En la bahía de Chetumal en Quintana Roo también utilizaron poliquetos como bioindicadores de contaminación por materia orgánica donde la zona con mayor concentración de materia orgánica tuvo la diversidad de especies más baja, en cambio en zonas con menor cantidad de materia orgánica si presentó mayor abundancia y diversidad (Kuk & Delgado, 2015).

Mejillón

El mejillón de la especie *Mytilus* spp es un bioindicador que lo han utilizado en muchos países, los llaman organismos centinela de la contaminación marina por ser excelentes vigilantes ambientales ya que proporcionan respuestas fisiológicas y celulares que se pueden ver, también tienen la capacidad de someterse a grandes niveles de contaminación, son filtradores y acumulan altas concentraciones de compuestos orgánicos y metales traza en sus tejidos, estos últimos más que todo se

concentran en las células digestivas, además facilitan la recolección y su distribución geográfica es amplia.

El uso del mejillón como bioindicador de metales pesados es una de las mejores herramientas para evaluar la contaminación en áreas costeras a nivel mundial, son organismos sésiles y filtradores que acumulan sustancias presentes en el medio ambiente, para que puedan ser usados como biomonitores debe haber correlación entre la cantidad del contaminante en el organismo y la concentración promedio del contaminante en el medio ambiente (Sánchez *et al.*, 2018). Factores tanto físicos como químicos afectan la concentración y bioacumulación de metales pesados en determinada parte de los mejillones, por lo cual se hace más complicada la identificación y análisis total de metales pesados dentro de los organismos y en el medio ambiente; por tal razón optaron por un modelo mecanicista biodinámico, que consiste en utilizar las branquias del mejillón para analizar la concentración de metales pesados ingerido por el mejillón (Sánchez *et al.*, 2018).

Durante los años de 1987 y 1988 en la franja costera del golfo de California se llevó a cabo un programa de monitoreo y vigilancia en las aguas costeras de este golfo haciendo uso del mejillón de la especie *Modiolus capax* como bioindicador de la contaminación por insecticidas (Gutiérrez *et al.*, 1992).

El mejillón cebra tiene el potencial de filtrar y acumular bacterias presentes en el agua, pero así mismo contamina nuevas aguas con los contaminantes que ha acumulado, de esta manera se convierte en bioindicador de la salud microbiológica del agua, un estudio realizado en la desembocadura del río Guadalupe en Zaragoza el

mejillón cebra acumuló en un transcurso de 24 horas la totalidad de bacterias *Enterococcus* sp y *Pseudomonas aeruginosa* (Miguel *et al.*, 2015).

En el Estero saldo al oeste del golfo Guayaquil y al occidente del río Guayas en Ecuador se realizó un estudio en las estaciones del Puente 5 de Junio y Puente Perimetral haciendo uso del mejillón como bioindicador de calidad del agua (Castro, 2017).

Briozoarios

Las comunidades de briozoos son propuestas como bioindicadoras de la calidad del agua, por su diversidad y composición de especies que son afectadas por cambios que se produzcan en el agua, como la salinidad, eutrofismo, oxígeno disueltos, temperatura alta y sólidos suspendidos; en aguas con mucho impacto las especies empiezan a disminuir, de hecho la especie *Bowerbankia* es una especie tolerante que fue hallada en un estudio realizado en el puerto de Kingston que contenía una salinidad variante (Polanía, 2010).

En Chile han encontrado 6 especies de briozoos dulceacuícolas de las familias Plumatellidae y Fredericellidae, las clases de Phylactolaemata pertenece a agua dulce, estos son de abundantes en ríos, lagos y lagunas y Gymnolaemata y Staenolaemata don de agua marina; las Phylactolaemata están presentes en aguas quietas, son tolerantes a un nivel de pH alto y en sustratos sumergidos se desarrollan perfectamente, estas clases

de briozoarios son considerados bioindicadores por ser organismos filtradores (Orellana, 2006).

Artrópodos

La presencia de artrópodos en los ecosistemas acuáticos juegan un papel muy importante ya que tienen una variedad y abundancia de familias en ríos, lagos, lagunas unos de forma temporal y otros de forma permanente, es precisamente esta diversidad la que los convierte en organismos bioindicadores de la calidad de aguas, siendo utilizados en un 70% de estudios utilizando índices bióticos por su facilidad de manejo y tamaño relativamente grande, han sido utilizados desde mediados del siglo XIX donde Kolenati descubrió que la ausencia de larvas de los tricópteros en un río era debido a que esas aguas pasaban cerca a una urbanización (Pujante, 1997).; entre las clases de artrópodos se encuentran:

Ácaros, arañas acuáticas, los colémbolos, insectos acuáticos , efemerópteros, megalópteros, heterópteros, coleópteros, dípteros, lepidópteros, neurópteros, cladóceros, copépodos, ostrácodos, isópodos y decápodos (Pujante, 1997).

Algunos de los estudios donde han empleado artrópodos son:

En el río Bernesga se hizo un estudio a 67 kilómetros de su nacedero y a 4 kilómetros al final del río Torío, (Calabuig *et al.*, 1986).

En el río Las juntas ubicado en el departamento de Ambato – Catamarca de Argentina (Zelarayán & Salas, 2014).

Crustáceos

Los crustáceos son uno de los grupos más numerosos y diversos de los invertebrados, la gran mayoría viven en aguas dulces, tienen diversos hábitats y nichos de alimentación, han sido importantes dentro de las investigaciones realizadas para evaluar la calidad del agua por su facilidad en la recolección en amplios hábitats y a su vez la resistencia una vez atrapados los convierte en organismos para evaluar la calidad de aguas, además de ser muy sensibles a metales pesados especialmente al cobre, por otra parte, son uno de los mejores bioindicadores de todo el grupo de los bentos, resaltando sus características como su abundancia en sitios donde se presenta la ausencia de otras especies que por la contaminación se han extinguido (Pujante, 1997), son sedentarios, varían genéticamente y ecológicamente; se adaptan a estudios de laboratorio, tienen larga permanencia en el ambiente permitiendo acumular y ver los efectos del contaminante a largo tiempo, (Espino *et al*, 2014).

Los crustáceos caprélidos, algunas especies resisten los altos grados de contaminación convirtiéndose en especies tolerantes, mientras que otras si desaparecen ante los altos niveles de contaminación (Guerra, 2009); su utilidad bioindicadora de la contaminación marina y calidad del ambiente en zonas costeras, ya que sin hacer ningún tipo de análisis físico químico es posible conocer si la zona está o no

contaminada, por ejemplo, si se encuentran especies como *Caprella ceutae*, *C. santosrosai*, *C. danilevskii*, *C. liparotensis* y *C. penantis*, es posible tener la plena seguridad de que estas especies por su sensibilidad están presentes únicamente en aguas libre de contaminación, pero cuando hay presencia de especies tales como *Caprella acanthifera*, *Pseudoprotella phasma* y *Phthisica marina* indican la presencia de aguas contaminadas ya que por ser especies tolerantes son capaces de soportar altos niveles de materia orgánica, metales pesados e hidrocarburos, su vez bajos valores de hidrodinamismo, estos crustáceos son excelentes bioindicadores para evaluar los impactos negativos por actividades humanas en zonas costeras (Guerra, 2011).

Uno de los estudios realizado con crustáceos fue en los lagos de los Andes Australes de Ecuador (Alonso *et al.*, 2017).

Insectos

Los insectos son un grupo de organismos muy variados, pero con una característica en común y es que son muy dependientes del agua, todos los hábitats en los ecosistemas acuáticos son ocupados por alguna especie; los insectos son llamados mega diversos por su gran cantidad de múltiples familias indicadoras del estrés o impacto acuático ocasionado por actividades humanas (Espino *et al.*, 2014). El desarrollo urbano de forma acelerada ha venido afectado todo tipo de aguas, no sólo a nivel local sino a nivel continental, provocando perturbación por la sobreexplotación de los recursos naturales, por lo cual resulta necesario la implementación de

mecanismos que ayuden a revisar y evaluar los cambios tanto físicos como químicos del agua, logrando así salvaguardar el estado de vida del sistema acuático, este tipo de monitoreo es posible llevar a cabo con bioindicadores como los insectos acuáticos muy comúnmente utilizados para evaluar la calidad del agua observando las respuestas que estos tienen frente a algún disturbio ambiental, de esta manera es posible determinar el grado de contaminación de cierta comunidad de insectos bioindicadores seleccionados por su alta sensibilidad, facilidad de recolección, tamaño, entre otras características; (Ramos *et al*, 2013). Algunos tipos de insectos son odonatos, dípteros, quironómidos (tapia, 2018).

Cabe resaltar algunos estudios que han utilizado insectos como bioindicadores, tales como:

En la cuenca Matanza Riachuelo de la provincia de Buenos aires se realizó un estudio con macro invertebrados quironómidos como indicadores de contaminación (Paggi, 2003).

En el caso de Inglaterra se evaluó el efecto de descargas por medio de exuvias pupales, (Paggi, 1999).

En México Kolkwitz (1908) y Marsson (1909), estudiaron las respuestas que tienen los organismos para determinar la calidad del agua, concluyendo que los insectos son un indicador biológico (Álvarez *et al*, 2012).

En un arroyo de agua en Ayacucho México, se llevó a cabo una evaluación de la calidad del agua haciendo uso de los insectos como indicadores de monitoreo, (Rosas *et al*, 2012).

Moluscos

Estos organismos son de cuerpo blando con piel muscular y estructura que produce concha, son de ambientes marinos, tienen un rango de vida amplio con distintos grados de tolerancia a la contaminación; por su abundancia y diversidad tienen el segundo lugar en la escala zoológica después de los artrópodos, según su naturaleza de vida pueden servir como bioindicadores aquellos moluscos sésiles receptores de sedimentos y contaminantes que con el tiempo se van acumulando en los tejidos y provocar reacciones tanto morfológicas como fisiológicas que definen el grado de toxicidad y así mismo, los efectos nocivos que puede provocar, un ejemplo de molusco bioindicador es el Tegogolo, es un molusco muy tolerante a la contaminación (Espino *et al*, 2014). También deben ser especies endémicas a ciertos tipos de agua y que las especies no se excluyan del agua y sus poblaciones desaparezcan de los sitios donde se viertan sustancias químicas y las especies acumulen en su interior metales o sustancias químicas (Mendoza, 2016).

Se plantean como bioindicadores de contaminación, ya que los moluscos tienden a desaparecer, otros acumulan sustancias a tal punto de resistir estos contaminantes y se convierten en especies tolerantes, son atraídos por cargas elevadas

de materia orgánica (MO) como es el caso de la especie *Tributyltin* y a la vez se exponen a otros contaminantes; la adaptabilidad y tolerancia que tienen los moluscos se han convertido en organismos de preferencia para el monitoreo de la contaminación y de esta manera evaluar la calidad de ecosistemas (Baqueiro *et al.*, 2007).

En el Archipiélago Canario utilizaron diversas especies de moluscos como bioindicadoras de la calidad del agua, con el objetivo de hallar una especie que proporcione información confiable y rápida sobre la conservación de ecosistemas, (Ramírez, 2010).

Vertebrados

Peces

Los peces son seres que se alimentan, viven, crecen y se reproducen en el medio acuático (Romano, 1999), son considerados bioindicadores ya que tienen la capacidad de monitorear, caracterizar y definir la calidad del agua (Aguilar, 2005), además han sido utilizados en monitoreos biológicos por su facilidad para ser identificados y así mismo ser capturados, por su amplia gama de información histórica existente de diversas especies, por su estructura trófica o representación de diferentes especies que comen alimentos acuáticos y terrestres, también por ser los más reconocidos en el ambiente acuático y que están presentes tanto en cuerpos de agua grandes como pequeños y aun así poder sobrevivir con ciertos grados de contaminación (Hahn-vonHessberg *et al.*, 2009) . Tienen la gran ventaja de evaluar el estado en que se encuentra cuerpos de agua o corrientes marinas en un determinado

momento, por tal razón, se utiliza organismos sensibles a cambios, revelando con facilidad la presencia de contaminación o alguna transformación de la fuente acuática o ecosistema, al igual, es posible ver la evolución de mejoramiento con el tiempo (González *et al.*, 2014).

En España se llevó a cabo un estudio donde se pretendía analizar si el pez cebra podría ser un indicador de sustancias extrañas en agua potable, enfocados en los efectos de su desarrollo, especialmente en su reproducción, como conclusión final según los resultados obtenidos en este estudio, el pez cebra cumple los estándares para ser un bioindicador eficiente para reaccionar ante los efectos de la contaminación orgánica en concentraciones mínimas, siempre y cuando hayan crecido o estado todo el tiempo en agua potable (Martínez *et al.*, 2016).

Tiburones

El mar enfrenta serios impactos ambientales ocasionados de manera natural como la deposición atmosférica, pero especialmente por la presencia humana que arroja desechos industriales y domésticos llenos de sustancias tóxicas como hidrocarburos, metales pesados, pesticidas, etc., a través de los ríos y aguas subterráneas; los tiburones por ser grandes depredadores de toda la cadena trófica del mar, sirven como bioindicadores para alertar la salud del ecosistema marino, ya que los contaminantes entran por medio de la respiración y través del consumo de sus presas, a

partir de ahí se identifica el nivel de contaminación que se encuentra en sus tejidos y de esta manera se alerta los niveles tóxicos para el consumo humano (Galván *et al.*, 2014).

Cumplen la función de bioacumuladores y biomagnificadores de diversos contaminantes, esto ha sido demostrado por las grandes concentraciones de elementos contaminantes que se ha encontrado en tiburones, incluso niveles por encima de los rangos permitidos en Estados Unidos para el consumo humano, por esta razón, los tiburones están considerados bioindicadores de la contaminación ambiental (González *et al.*, 2014).

Son grandes bioindicadores de metales pesados a tal punto que en México se ha extendido estudios de contaminantes en tiburones, enfocándose especialmente en metales pesados como el mercurio; (Galván *et al.*, 2014).

Aves:

Los humedales representan un ecosistema muy importante para muchas aves acuáticas que están allí de paso, lo utilizan únicamente como su dormitorio o es su hábitat a lo largo de su vida (González *et al.*, 2011). Las aves acuáticas tales como las garzas, patos buceadores, rálidos, son buenas bioindicadoras de cambios ambientales en determinada zona que presenta humedad, esto debido a su gran potencial para dar a conocer cambios evidentes en su hábitat cuando este no está funcionando a su perfección; censos que han venido haciendo desde los años 60, permiten observar el cambio histórico hasta la actualidad, las aves concentran una gran variable de efectos

provenientes de distintos factores presentes en el ecosistema, tales como: tamaño del humedal, profundidad, presencia vegetativa, etc., ya que esto influye directamente en la cantidad y variedad de aves acuáticas, por ejemplo, a los patos buceadores les gusta las zonas más profundas mientras que a los patos nadadores no tanto, las garzas y otras aves piscícolas se distribuyen por todo el humedal dependiendo de la cantidad y disponibilidad de peces en cada zona. Se ha evidenciado que donde desaparece el hábitat o son perjudicados los humedales, las aves acuáticas también desaparecen, esta es una gran amenaza a la que se tienen que enfrentar estas aves, lo que permite que las aves respondan rápidamente a cambios limnológicos en su capacidad de dispersión en el hábitat, sin embargo, en otros estudios, que las aves sean bioindicadoras no se ha podido demostrar por información escasa sobre otros factores que es muy probable que también influyen como la salinidad, pH, aguas abiertas, nutrientes, etc (Green *et al.*, 2003).

Plantas

Las plantas son utilizadas altamente como herramientas de reconocimiento y sensibilidad antes el estrés ambiental en los ecosistemas acuáticos, estas resultan ser altamente efectivas ya que su condición no les permite tener movimiento de un lado hacia otro, por lo que nos les queda más que producir un equilibrio ambiental; plantas como *Elegrass* es bioindicadora de la calidad del agua en zonas costeras ya que se caracteriza por indicar la situación antropogénica en que se encuentra estos cuerpos de agua, en el caso de *Limnanthemum cristatum* cuando existe concentración de cromo en

el cuerpo acuático empieza a desaparecer los pelos radiculares y en las hojas más jóvenes se presenta coloración, *Wolffia globosa* también en diversos estudios ha demostrado su sensibilidad por contaminantes como Cadmio (Akanksha *et al.*, 2010).

En Italia en la cuenca del río Tíber se evaluaron varias plantas macrófitas bioindicadores de la calidad del agua, los resultados de este estudio arrojaron que *Nasturtium Officinalis*, *Elodeo potametum crispi*, *Ranunculo sietum* y *Fontinaletum antipyreticae* son bioindicadoras de aguas muy limpias y mesoeutróficas; las especies *Ceratophylletum demersi* y *Potamogeton Nodosu* son bioindicadoras de aguas eutróficas y de calidad media; mientras que las especies *Potametum pectinati* y *Myriophylletum spicati* son bioindicadoras de aguas con baja calidad (Ceschin *et al.*, 2010).

Algas

Las algas normalmente tienden a responder ciertas alteraciones antropogénicas en el agua, como por ejemplo el ingreso de contaminantes tóxicos o el exceso de nutrientes, de esta manera se convierten en bioindicadoras de la salud acuática, teniendo en cuenta que absorben todos los elementos que están presentes en el agua en que crecen, también algunas especies han demostrado ser bioindicadoras de metales pesados, por lo cual estas sirven perfectamente como monitores de contaminación en medios acuáticos, también tienden a responder a impactos causados por el hombre y sus ciclos de vida cortos les permite ser bioindicadoras adecuadas de alteraciones a

corto plazo, normalmente los cambios se reflejan alterando sus características físicas y químicas dentro de la columna del agua, ya que según estudios la acumulación de metales pesados en la columna del agua y la acumulación dentro del cuerpo del agua son directamente proporcionales, también se dice que entre mayor concentración de metales las algas absorben menos, por tanto, con mínimas concentraciones las algas reaccionan inmediatamente, esta capacidad de las algas para absorber y concentrar metales pesados del agua, también intervienen factores tanto físicos como biológicos que pueden interferir en la acumulación de metales, tales como el pH, luz, temperatura, salinidad, estacionalidad, etc., (Ospina & Peña, 2004).

En Colombia algunas de las especies de algas utilizadas en aguas continentales han sido utilizadas como bioindicadoras de la calidad del agua *Anabaena* sp, *A. circinalis*, *A. A. flosaquae*, *A. sphaerica*, *A. suptrópica*, *Anabaenopsis rarciborski*, *Anacystis* sp (Akanksha *et al.*, 2010).

El fitoplancton es un alga microscópica donde su ciclo de vida es muy corto, sin embargo, responden rápidamente a cualquier fluctuación ambiental, ya sea de tipo natural o antropogénico (Mendoza, 2016). El plancton fue analizado como bioindicador de la calidad del agua en zonas agrícolas andinas, el estudio se llevó a cabo en la Parroquia de Puéllaro que está ubicado en el valle interandino del noreste del Distrito Metropolitano de Quito, Ecuador (Escobar *et al.*, 2013).

Zooplancton

El zooplancton es un grupo de animales acuáticos capaces de suspenderse en el agua debido a sus estructuras especiales para nadar, todas las especies del zooplancton heterótrofos y su alimentación es muy diversa, su ciclo de vida es muy corto, son organismos muy pequeños y se reproducen en grandes cantidades, lo que permite que estos organismos sean bioindicadores y a la vez sirven para estudios eco toxicológicos (Mendoza, 2016). Algunas especies del zooplancton son muy sensibles a ciertos agroquímicos (Garza *et al*, 2011), el zooplancton que se encuentra en agua dulce tiene diversidad de especies, sin embargo, son tres los grupos más dominados (rotíferos, cladóceros, copépodos) por su abundancia, diversidad y biomasa (Mendoza, 2016). Las especies de zooplancton *Habrotrocha* sp son bioindicadoras de buena calidad, *Otostephanus* sp está presente en aguas para riego y en aguas con presencia de actividades agrícolas y *Brachionus* sp es una especie con sensibilidad a la toxicidad (Peña *et al.*, 2005).

El zooplancton se alimenta de algas y de materia orgánica, pero también son alimento de larvas y peces, estas poblaciones de zooplancton pueden sufrir cambios como respuesta al estrés hídrico con ciertas perturbaciones y alteraciones químicas, físicas y biológicas (Astiz & Álvarez, 2014).

En Matehuala, San Luis Potosí en México se evaluaron especies de zooplancton en aguas contaminadas por Arsénico (Mendoza, 2016).

Virus

Conocer los microorganismos existentes en el agua ya sean patógenos y no patógenos representan una gran importancia con el fin de definir los posibles bioindicadores microbiológicos utilizados para evaluar en laboratorio y de esta manera conocer la salud microbiana de los sistemas hídricos (Ríos *et al*, 2017). Los microorganismos patógenos acuáticos que muchas veces son pocos conocidos para la población, los virus en agua superficiales pueden ser de 5 a 25 veces más abundantes que las bacterias (Espinosa *et al*, 2004). El número de casos de enfermedades causadas por virus transmitidos por el agua son mucho mayores que los casos emitidos por bacterias y protozoos (Espigares, 2006). Existen microorganismos que hacen parte del sistema acuático de forma natural, como también existen otros que llegan de las descargas de aguas residuales, siendo estos agentes patógenos que representan un gran problema de salud pública, especialmente para la población infantil produciendo enfermedades gastrointestinales y de tipo viral (Espinosa *et al*, 2004). Los virus son los microorganismos más abundantes de la tierra por lo que todo organismo es susceptible a infectarse por algún tipo de virus, por eso la importancia de monitorear y evaluar la presencia de virus en los cuerpos de agua y más aún si son para consumo humano, los sedimentos también conllevan enterovirus que se movilizan por medio de aguas subterráneas y aguas lluvia (García *et al*, 2001).

El agua debe cumplir con ciertas características de calidad para el consumo humano por lo que si el intervalo CF/EF es < 0.7 indica que la contaminación es de tipo animal y si es $>$ indica que es contaminación por materia fecal humana,

apareciendo los clostridios sulfito reductores que forman esporas y resisten a las condiciones ambientales y desinfección, por ende, los virus hídricos son muy resistentes a los procesos de tratamiento, por tanto, estos bioindicadores víricos lo que hacen es que se excretan por periodos de tiempo cortos en cantidades de 10^{12} por gramo de heces fecales (Espigares, 2006)

Algunos de los virus que se encuentran en aguas son:

En Colombia los datos de vigilancia de la calidad del agua en los años 2008 a 2012 se evidenció que existe un porcentaje de cuerpos de agua que no cumplen los patrones de potabilidad teniendo en cuenta los índices bacteriológicos, en estos 4 años del 28% a 23% de las muestras remitidas a Vigilancia no cumplían con los niveles de E. Coli y entre el 40 y 33% no cumplía con los Coliformes, por lo tanto, hacían presencia los virus entéricos a pesar del agua estar tratada, puede estar relacionado con tratamientos no adecuados, sistemas de distribución en mal estado, almacenamiento inadecuado, fenómenos climáticos muy extremos ya sea en tiempo de verano o invierno (Peláez *et al*, 2016).

Suelo

Los bioindicadores situados en el suelo son de gran utilidad para valorar el efecto y grado de contaminación, estos indicadores biológicos de la calidad del suelo se relacionan con biodiversidad de microorganismos y biomasa son una gran herramienta para monitorear el estado de los suelos (Garbisu *et al.*, 2007). Es importante tener en

cuenta que todo ser vivo depende de la calidad del suelo para sobrevivir, por lo tanto, es un recurso que debe ser protegido como una política que obligue a dar un uso adecuado del suelo, teniendo presente bioindicadores que evalúen y evidencien su calidad (Bautista *et al.*, 2004). Un suelo de calidad debe cosechar cultivos sanos y mantenerse a largo plazo, además de promover la salud a las personas y animales que se benefician de este preciado recurso (Astier *et al.*, 2002). “Los indicadores de calidad del suelo deben responder a prácticas de gestión, integrar procesos ecosistémicos, y ser componentes de bases de datos existentes y accesibles” (Knoepp *et al.*, 2000).

Según Nogales (2010) y García *et al* (2012), las condiciones que debe cumplir los bioindicadores de la calidad del suelo son: deben ser fáciles de medir, tener información fácil de reconocer, ser íntegros, tener poca variabilidad en sus respuestas, tener sensibilidad al estrés ambiental, tener aspectos prácticos y claros, responder de forma adelantada a cambios reversibles, aceptar cambios y diferencias en los ecosistemas, integrar procesos químicos, físicos y biológicos del suelo.

Invertebrados

Los invertebrados se consideran buenos bioindicadores de la condición ambiental en una región, por ser altamente diversos, tienen variedad de procesos ecológicos, pero sobre todo sensibles a disturbios ambientales tanto naturales como antrópicos, además de poderlos observar y evaluar con facilidad (Villalba, 2014). Los macro invertebrados en el suelo cumplen la función de regular todos los procesos que

se ejecutan en el ecosistema, trayendo consigo efectos muy positivos que contribuyen en la estructura del suelo, la aireación, microclima y humedad, activando de esta manera la actividad de los microorganismos relacionados con la conservación y ciclo de nutrientes; en sí esta comunidad de macro invertebrados presentan alta sensibilidad a los impactos y cambios que se presenten afectando negativamente el ecosistema, esto los hace buenos bioindicadores de los efectos causados por el hombre (Morales & Sarmiento, 2002). La presencia o ausencia de los macro invertebrados indican la calidad del suelo, diversos autores plantean que la riqueza de invertebrados dominantes revela un mayor aporte informativo a cerca de la calidad del suelo, siendo estos organismos proveedores de varios servicios ambientales (Carlosama & Mora, 2014).

En el municipio de Manaus en Brasil determinaron comunidades de organismos pertenecientes al suelo para a su vez identificar su importancia y comportamiento, donde concluyeron que los procesos del suelo dependen básicamente de la actividad de los macro invertebrados (Coral *et al.*, 2016).

Artrópodos

Los artrópodos son insectos de diferentes clases y son los más diversos en toda la superficie terrestre, la mayoría tienen una relación muy cercana con cada hábitat en que se encuentra, lo que hace que respondan eficazmente a cambios en el ambiente, ya sea por la presencia o ausencia de estos insectos en el ecosistema (Soares *et al.*, 2017).

Además constituyen una de las comunidades más importantes que habitan en el suelo prestando diversos servicios eco sistémicos como es la descomposición de materia orgánica, formación del suelo, mejoramiento de la fertilidad, regulación del agua y micro flora, además de su sensibilidad a la humedad y variación de temperatura los bautiza en bioindicadores aptos para evaluar la sostenibilidad del suelo, algunas especies presentan alta sensibilidad a los cambios en la salud del suelo, esto teniendo en cuenta que estos seres no sólo viven en el suelo sino que también comen y se reproducen a través del suelo; ya muchos estudios confirman el uso de artrópodos como bioindicadores de la calidad del suelo, en el caso de los *Collembola*, *Acari* y los micro artrópodos son los más estudiados y empleados por su cantidad y diversidad, (Menta & Remelli, 2010).

Algunos de los tantos estudios con artrópodos han sido:

En una granja de manzanas semi orgánicas y otro en una granja convencional en la ciudad de Batu, implementaron artrópodos para mejorar la práctica agrícola y mejorar la producción de manzanas, (Zuhro *et al.*, 2019).

En el este de Australia subtropical estudiaron los artrópodos en una tierra de bosque y otra de pastoreo como posibles bioindicadores de áreas boscosas y despejadas (Nakamura *et al.*, 2007).

En el Municipio de Igüeña en España se llevó a cabo un proceso de restauración de suelo utilizando la metodología edafopaisajística en dos escombreras luego de ser afectadas por minería de carbón, (Tizado & Núñez, 2013).

Arañas

Las arañas presentan sensibilidad a pequeños cambios ambientales, por lo que de una vez se ve reflejado en la fauna, por tal razón las arañas son ideales para monitorear la calidad ambiental del suelo; en el caso del parque general de San Martín, Argentina hicieron un estudio sobre la abundancia de arañas en suelos, pero en ambientes diferentes: bosque nativo, bosque exótico y pajonal, donde según los resultados se observó muy pocas especies dominantes en el pajonal y bosque exótico, mientras que en el bosque nativo si hay una comunidad de especies equitativas con mayor diversidad y con menor dominancia, por lo tanto, la diversidad de arañas existentes en el suelo están directamente influenciadas por los cambios que se presenten en el hábitat (Almada *et al.*, 2017). Por lo tanto, se expresa que desde ya un tiempo se ha venido teniendo gran interés por hacer uso de las arañas como herramienta para hacer monitoreo ambiental, resaltando su gran potencial como bioindicadoras de cambios ambientales originados de manera natural y antrópicos (Simó *et al.*, 2011).

Hormigas

Las hormigas son un grupo de insectos bastante abundantes, consideradas fundamentales en ecosistemas naturales y en los impactados por el hombre, esto teniendo en cuenta que su actividad transforma la naturaleza física y química de la

calidad del suelo, su porosidad, su estructura, nutrientes aprovechables y contenido de materia orgánica (Villalba *et al.*, 2014). Los cambios o pérdidas en la vegetación y las alteraciones tanto físicas como químicas de suelo, afectan directamente la cantidad y composición de hormigas, viéndose de esta manera afectado el ecosistema teniendo en cuenta que las hormigas ofrecen muchos bienes y servicios; por lo cual las hormigas juegan un papel muy importante dentro del ecosistema ya que son bioindicadoras de alteraciones ambientales debido a su abundancia y diversidad de especies, ocupan varios nichos, responden rápidamente a cambios ambientales y se pueden identificar fácilmente; esto las hace ser eficaces para evaluar respuestas bióticas en la agricultura, tales como la fertilización, quemas y fumigación; cabe resaltar que el uso de herbicidas elimina la vegetación viéndose afectadas las hormigas de forma indirecta, la especie *S. geminata* es tolerante a los insecticidas pero como muchas otras especies no lo es con los herbicidas (Chanatásic *et al.*, 2011). Lobry de Bruyn en 1999 propone que las hormigas sean indicadoras de la calidad del suelo en áreas rurales, afirmando que las hormigas tienen gran influencia en el movimiento del agua, bioturbación, reciclaje de nutrientes y pedogénesis (Arcila & Lozano, 2003).

En el bosque atlántico de Brasil víctima de la deforestación, utilizaron hormigas como organismos bioindicadores para valorar el proceso de restauración del bosque, (Segat *et al.*, 2017).

Venuste (2019) dice que las hormigas indican la calidad del suelo de manera diferente ya que todo depende del uso que se le esté dando a la tierra, lo anterior teniendo en cuenta que Venuste junto a otros autores llevaron a cabo un estudio en el

sur de Ruanda sobre el uso de hormigas de suelo y de hojarasca bajo diferentes tipos de árboles.

Termitas

Las termitas tienen un potencial increíble para mejorar la fertilidad de suelos, además de cumplir la función de descomponer la materia orgánica, ya que está a medida que el suelo evoluciona los niveles de materia orgánica también aumenta, aumentando también la cantidad de especies de organismos del suelo, lo que las convierte en buenas bioindicadoras de la calidad del suelo, aunque para muchos agricultores son consideradas como plagas, la actividad de las termitas se puede conocer por nidos con forma de montículos que pueden llegar a los 4 metros, ellas construyen caminos y estructuras subterráneas; las prácticas inadecuadas e insostenibles en la agricultura con el uso de insumos que provocan daños en la biomasa se han visto afectadas las termitas por alteración en el ecosistema, estas especies pueden ser eliminadas, en cambio donde es bajo o nulo el uso de pesticidas sobreviven algunas especies de la comunidad africana, sus nidos contienen cantidades de carbono, potasio y nitrógeno por lo que contienen buenos nutrientes para el suelo (López, 2003).

Las termitas son bioindicadoras porque aportan con la estructura y funcionamiento del suelo, siendo sensibles a los cambios o perturbaciones en el ambiente, ellas producen cambios en su dinámica de población al igual que la oferta de

alimento, en la Meseta de San Pedro en Casanare llevaron a cabo un estudio sobre la diversidad de termitas en plantaciones forestales de *Pinus caribaea Morelet*, allí hubo un impacto positivo en cuanto al contenido de carbono del suelo y la composición de termitas, a su vez una relación negativa fue una disminución de densidad facilitando el crecimiento de los árboles; se demostró que son bioindicadoras útiles en los cambios ocasionados por la intensificación del uso de suelos (Beltrán, 2017).

Un estudio de caso realizado en Indonesia de comunidades de termitas como bioindicadores en tierras altas del monte Slamet, Java central, donde pretendían investigar la respuesta que tienen las termitas a la tierra, allí pudieron darse cuenta que las termitas que encuentran su alimento en el suelo y son muy sensibles al impacto de su hábitat (Bourguignon *et al.*, 2015).

Lombrices

Las lombrices de tierra son bioindicadoras de la calidad del suelo y son sometidas a prácticas productivas intensivas que provocan graves impactos que deterioran el suelo, tales como: limitación y pérdida de biodiversidad, salinización y erosión; por tal razón, las lombrices son útiles como bioindicadores por lo que tienen ciclos de vida extensos, baja dispersión a nivel geográfico y una movilidad relativamente moderada por lo que se han evidenciado que tienen una capacidad indicadora sobre su hábitat dependiendo de sus características químicas, físicas y biológicas (Momo *et al.*, 2003). Las lombrices representan un papel importante dentro

de la fauna edáfica, ya que su presencia permite y facilita el crecimiento de raíces de las plantas, teniendo en cuenta que los excrementos de las lombrices, además de retener agua tienen bastantes nutrientes que son absorbidos por la vegetación (Rendón *et al.*, 2011).

La lombriz de tierra constantemente se encuentran expuestas a contaminantes que entran a su tracto intestinal, donde se va acumulando los contaminantes a la que se encuentra expuesta; generalmente se ven afectadas en agriculturas que hacen uso de pesticidas, afectando no solo la calidad del suelo sino los organismos que habitan allí, estas lombrices de tierra después de un tiempo de estar en un suelo contaminado pueden tener cambios celulares y ecológicos, moleculares, etc., por tal razón, la lombriz es un organismo bioindicador de exposición es sometido a múltiples ensayos de toxicidad para evaluar la toxicidad del suelo o evaluar qué tanto potencial de contaminación tienen nuevos pesticidas que empezaron a utilizar (Araneda *et al.*, 2016).

En Zipacón Cundinamarca se llevó a cabo un estudio con lombrices de la especie *Pontoscolex Corethrurus* como bioindicadores de suelos utilizados para ganadería (Gutiérrez & Cardona, 2014).

Colémbolos

Los colémbolos son un grupo de artrópodos que viven en el suelo, se caracterizan por su gran diversidad y abundancia de especies, son bioindicadores

ecológicos ya que cuentan con características como adaptación a la vida edáfica, tienen un ciclo de vida corto, tienen habilidad de dispersión, son degradadores de materia orgánica, son tolerantes a metales pesados como el plomo (Pb), zinc (Zn), cadmio (Cd) y cobre (Cu), reaccionan cuando hay perturbación en el suelo, notándose una ligera reducción de especies y disminución de su crecimiento, esto lo descubrió Kopeszku en 1997 en un estudio que hizo en Viena - Australia durante 6 meses, donde descubrió que estas reacciones por parte de los colémbolos era debido a la presencia de fertilizantes nitrogenados, ácidos y metales pesados en el suelo; estos invertebrados se alimentan de materia vegetal y hongos, algunas especies se alimentan de otros seres vivos como rotíferos, nematodos, así mismo contribuyen con el control de hongos y bacterias, así como son depredadores también son presa para otros insectos como las hormigas contribuyendo así con la cadena trófica (Uribe *et al.*, 2010). Los colémbolos liberan gran cantidad de heces fecales y estas sirven de sustrato para otros microorganismos del suelo que con el pasar del tiempo se convierte en nutrientes para las plantas, estos seres son muy eficientes y activos descomponiendo materia orgánica y reciclando nutrientes (Querubín & Vázquez, 2012).

Según estudio realizado en Costa Rica, los colémbolos influyen directamente con las características físicas, químicas y biológicas de los suelos, el estudio lo realizaron en tres suelos con diferentes usos: cafetal, bosque primario y bosque secundario (Guillén *et al.*, 2006).

Plantas

Los bioindicadores de la calidad del suelo generalmente no son tan precisos ya que se centran por separado en los aspectos tanto físicos como químicos, mientras que las plantas si centran los aspectos físicos, químicos y biológicos juntos; en el caso de las malezas proliferan en diferentes condiciones pero si la calidad del suelo cambia para bien o para mal ellas también sufren ese cambio, por ejemplo las malezas que se adaptan más a condiciones desfavorables, en suelos pobres se convierten en plantas dominantes y las más sensibles simplemente desaparecen, cuando es un suelo rico en nutrientes existen diversas especies pero la que es más sensible es la que domina el territorio, en el caso de los agricultores ellos ya conocen y utilizan bioindicadores que le indican la fertilidad, ya reconocen las plantas que nacen y crecen en suelos buenos y en suelos malos (García *et al*, 2012).

Una planta es considerada como bioindicadora cuando reacciona a distintos grados de contaminación, además de poderse cuantificar y cualificar los daños causados sobre sus superficies, lo que la convierte en una herramienta biológica para el control y seguimiento de alteraciones ambientales; en el caso de las plantas vasculares cuando detectan la presencia de contaminación se manifiestan con una tendencia a desaparecer (Aguirre & Aguirre, 2008).

Existen plantas nativas que crecen en entornos mineros o suelos contaminados por metales llamadas pseudometalofitas y metalofitas que han desarrollado ciertos mecanismos tolerantes a la presencia de estos contaminantes, estos metales permanecen por mucho tiempo aún después de que no exista actividad industrial ya

que estos no se degradan, esta persistencia en el ecosistema representa una amenaza tanto para la salud del suelo como para los demás seres vivos que se benefician de él, por lo que se convierte en un suelo no apto para procesos naturales del suelo ni actividades de microorganismos biológicos, en consecuencia estos tipos de suelo inician con la desaparición de plantas o a presentar disminución en su desarrollo y productividad (Becerril *et al.*, 2007).

En la microcuenca llamada Luquigüe en Yoro, Honduras se hizo un estudio con el fin de estudiar la maleza y a su vez identificar las plantas que sirven como bioindicadoras de la calidad de suelos (Zaconeta, 2000).

Microbianos

La calidad de suelos agrícolas depende de la actividad microbiana ya que de esto depende la calidad y salud del suelo, estos microorganismos son de vital importancia en el ciclo de nutrientes tales como el C, P, N y S, al igual que contribuyen con la degradación orgánica y vegetal (Neiendam & Winding, 2002), a medida que se va descomponiendo los residuos y la materia orgánica los nutrientes que se encuentran en exceso o disponibles como el N, P y S se liberan en todo el suelo para ser utilizado por las plantas, es importante tener en cuenta que los desechos que producen los microorganismos hacen parte de la materia orgánica presente en el suelo, la descomposición de estos residuos junto con el almacenamiento de carbono en su biomasa y en la restauración de carbono el suelo cumple una función muy importante

en el reciclaje de nutrientes para dar a los cultivos los nutrientes requeridos, los cambios biológicos que realizan esta comunidad de bioindicadores microbianos constituye en un 80 a 90% de procesos es realizado por ellos, los aportes de materia orgánica, la creación de CO₂, el fraccionamiento de rocas y la mediación entre el ciclo biogeoquímico (García *et al.*, 2012).

Son sensibles y actúan de inmediato a cambios que se presenten en el suelo, tales como propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, como consecuencia de la degradación en el hábitat de estos microorganismos, además de reducir la calidad del suelo ocasionado principalmente por la agricultura (Soci, 2018). En Europa los programas de vigilancia de salud los implementan con bioindicadores microbianos viéndose beneficiados por estos microorganismos que aportan con información en el monitoreo de la calidad del suelo (Neiendam & Winding, 2002). La actividad microbiana ha sido un excelente bioindicador potencial para evaluar la calidad del suelo, debido a la actividad biológica que presentan, su facilidad para medir y su pronta respuesta a cambios (Nogales, 2010), estos cambios biológicos son: la degradación, aporte de materia orgánica, CO₂ en la respiración, la intervención en la movilidad de los ciclos biogeoquímicos de los elementos y los efectos mecánicos de los animales y las plantas, así como el fraccionamiento de las rocas por las raíces, entre otros (Porta *et al.*, 2003).

Bacterias

El uso de agricultura intensificada viene provocando no sólo pérdidas productivas sino deterioro en todo el ecosistema, tales como la disminución de materia orgánica, desertificación, perturbación del ciclo del agua y biogeoquímico, por tal razón, es de vital urgencia tener bioindicadores microbianos que de manera temprana y oportuna brinden respuesta sobre la salud actual del suelo, esto con el fin de disminuir y mitigar costos ambientales con la ayuda de bacterias que tienen la capacidad de dar a conocer las consecuencias de la biomasa de la tierra, dado que tienen funciones diferentes a la del ecosistema teniendo una composición muy sensible a las alteraciones del suelo (Trivedi *et al.*, 2016).

Las bacterias tienen la capacidad de descomponer compuestos de carbono como las exudaciones de raíces y residuos proveniente de plantas, los desechos que van produciendo las bacterias se convierten en materia orgánica, inclusive algunos tipos de bacterias tienen la capacidad de descomponer contaminantes del suelo, incluso pesticidas; además son fundamentales en la inmovilización de nutrientes en sus células, lo que permite que no haya pérdida de nutrientes en las raíces de las plantas, también existen bacterias que son biosensoras, es decir, que reaccionan a ciertas situaciones de estrés como por ejemplo la existencia de toxicidad en el suelo causada por contaminantes, estas bacterias tienen esta habilidad por genes que le generan cierta señal de alerta (Neiendam & Winding, 2002, p. 40, 61). Las bacterias pertenecen al grupo microbiano más abundantes del suelo constituyendo 10⁹ unidades de colonias por cada gramo de suelo en la rizosfera (García *et al.*, 2010).

En Polonia hicieron un experimento en un suelo agrícola con una capa superficial de suelo de 20 cm, este suelo se encontraba contaminado con sustancias de petróleo, todo indica que los microorganismos al entrar en contacto directo con las partículas del suelo son muy sensitivos a cualquier impacto o estrés que sufre el ecosistema terrestre, además de reflejar el estado biológico del suelo (Wolińska *et al.*, 2016).

Micorrizas

Existen dos tipos de micorrizas más importantes:

Micorrizas ectomicorrizas (ECM)

Son hifas de hongos que se establecen en la parte externa de las raíces, a tal punto que pueden ser vistas a simple vista por esporocarpos por medio de la red de Harting, su principal función es intercambiar nutrientes, la planta recibe nitrógeno y fósforo y el hongo recibe carbono, mejorando de esta manera la absorción de nutrientes por la raíces, de esta manera crean una barrera protectora contra patógenos que traen enfermedades a la raíz de ECM (Pérez & Read, 2004).

La Presencia de las ECM es fundamental en el suelo para el crecimiento adecuado de las plantas, estas tienen varios beneficios pero este depende de medio climático y ambiente en que se encuentren, son muy resistentes al estrés hídrico por eso cuando las ECM se establecen muy bien en las raíces es notable en las plantas una

mejor supervivencia, por ejemplo en Argentina la región Andino Patagónica tiene mucha precipitación mediterránea, lo que la convierte en una región con estrés hídrico y la simbiosis de ectomicorrizas juegan un papel muy importante, donde su presencia es vital e indispensable (Barroetaveña & Rajchenberg, 2003).

Micorrizas arbusculares (MA):

Son un conjunto de micelios fúngicos benéficos (hongos y raíces) que penetran la raíz de las plantas, estableciendo una unión bajo el suelo con las raíces de varias plantas, ofreciendo de esta manera diversos beneficios de supervivencia y funcionamiento mutuamente, ya que la planta le facilita al hongo carbohidratos de su fotosíntesis y espacio para llevar a cabo su ciclo de vida, y el hongo le permite a la planta obtener mayor cantidad de agua, a su vez le proporciona defensas contra posibles patógenos, además le ofrece minerales como el fósforo que no es muy fácil de encontrar en el suelo (Camargo *et al.*, 2012), entre otros beneficios estos hongos aumentan la resistencia a parásitos en sus raíces, aumentan la tolerancia a la resequedad o sequía y reducción del estrés ambiental (García *et al.*, 2010).

El uso de micorrizas puede dar un ahorro hasta del 50% de fertilizantes químicos, insumos y en general reducción de costos, propagando de esta manera una agricultura más sana y sostenible, ya que las micorrizas cumplen la función de ser un fertilizante ecológico, este proceso de inoculación con micorrizas incrementan de un 15 a 50% el crecimiento de las plantas con mayor altura y calidad en la floración, etc.; en Colombia el uso de estos microorganismos ha sido un éxito contribuyendo a solventar

problemas en la agricultura debido a la calidad del suelo, estos fertilizantes de micorrizas son una gran alternativa para disminuir pérdidas en cultivos (Noda, 2009).

En la Amazonía colombiana los suelos contienen pocos nutrientes por lo cual implementaron MA para contribuir con el crecimiento de las plantas naturales y cultivos (Garzón, 2016).

Nematodos

Los nematodos son gusanos que miden entre 0,2 y 12 mm, su cuerpo es muy flexible lo que les permite dar muchos movimientos (Susana *et al.*, 2013), aportan en la sostenibilidad agrícola, actuando como bioindicadores de impactos de producción y cambios ambientales, en ecosistemas naturales y en suelos utilizados por el humano; aproximadamente un 10% de especies de nematodos son dañinos con las plantas y son llamados fitoparásitos culpables de un 13% de pérdidas cultivos agrícolas a nivel mundial aproximadamente, las especies *Rhabditidae* se ven afectados cuando aumenta las fuentes de alimentación, esto por ser una especie colonizadora, en cambio la especie *Cephalobus* que no son colonizadoras no se ven afectados cuando aumentan las fuentes de alimentación y sí responden a cambios en la humedad, materia orgánica, temperatura y en sus características químicas, físicas y biológicas del suelo (Silva & Franzener, 2017). Se dividen en 2 grupos dependiendo de su actividad para colonizar diversos ambientes, están los colonizadores y los persistentes, donde la escala que se utiliza para evaluar un disturbio ambiental es de 1 a 5, donde 1 son los colonizadores

excesivos y 5 a los persistentes excesivos, cabe destacar que también están los nematodos que se ubican en la escala 2 a 4 y son la base para hallar la ecuación en los monitoreos ambientales (Esquivel, 2013).

Los nematodos son escogidos como bioindicadores con más frecuencia ya que se conoce más sobre su historia y taxonomía, además de que tienen un rol importante en procesos biológicos y ecológicos de la calidad del suelo, estos invertebrados tienen dientes que sujetan presas aportando en la supresión de plagas invasoras, son variables en cuanto a los tipos de ciclos de vida, son fáciles de identificar por sus estructuras morfológicas asociados a la alimentación, abundancia y tamaño, tienen una cutícula permeable que les permite tener contacto directo con contaminantes, algunos son resistentes por lo que sobreviven inactivos cuando el ambiente no es favorable mientras que otras especies si son muy sensibles a estos cambios ambientales, por otra parte, las fluctuaciones son tan rápidas comparadas con la de otros organismos y además son ubicuos incluso en sitios contaminados (Sánchez & Talavera, 2013). Los agricultores deben tener conocimiento y hacer uso de los nematodos como bioindicadores para mejorar las prácticas de sostenibilidad del suelo y no causar desequilibrio en la biodiversidad del mismo, ya que los nematodos tienen cualidades que los resaltan como su abundancia en casi todos los ambientes, tienen diversos hábitos de alimentación y estrategias de vida, son correctores de la acidez del suelo recuperando áreas perturbadas (García *et al.*, 2010).

Un estudio que realizaron en Argentina en suelos perturbados con diversos contaminantes de origen industrial y agrícola, estudiaron los nematodos bacteriófagos como bioindicadores (Otero *et al.*, 2002).

Protozoos

Los protozoos son organismos unicelulares que abundan en el suelo y son muy útiles en la calidad del suelo contribuyendo en la fertilización, son sensibles a cambios ambientales, tienen presencia en diversos ambientes, es decir que están en todas partes, por esta razón los han nombrado bioindicadores de la calidad o salud del suelo, además de su habilidad para alertar de forma temprana; por ejemplo en el Reino Unido los han usado como bioindicadores de la contaminación de suelo por metales pesados (Neiendam & Winding, 2002, p. 55).

Los protozoos pertenecen a dos grupos, unos de tipo patógeno y otros de vida libre, los de vida libre son bioindicadores de la calidad del suelo en el que viven; por otra parte, cabe resaltar que en Colombia y otros países realmente los estudios con protozoos realmente han sido realmente mínimos (Sanabria, 2018).

Murciélagos

Los murciélagos pertenecen al orden chiroptera, ocupan el segundo lugar de los mamíferos más diversos y abundantes, además de ser presas de otros animales también

son depredadores, dispersan semillas, distribuyen materiales y nutrientes; a nivel económico contribuye con el control de plagas, aunque se ven afectados disminuyendo su población debido a las actividades realizadas por humanos, tales como la destrucción de sus cuevas o hábitat, limitación de alimento y la caza de estas especies, esto teniendo en cuenta que la mayoría de veces existe la ignorancia sobre sus grandes funciones ecológicas positivas sobre el ecosistema (Kasso & Balakrishnan, 2013).

Los murciélagos ofrecen respuestas medibles en cuanto a la pérdida de hábitat y cambio climático, son estables taxonómicamente y en cuanto a los murciélagos insectívoros presentan alta sensibilidad por estar en un nivel trófico alto puesto que se relacionan directamente con las perturbaciones del hábitat, además presentan sensibilidad a la acumulación de insectos plaga, esto puede ocasionar cambios en sus poblaciones y versen en problemas por diversos factores estresores; de esta manera la actividad de los murciélagos puede cambiar debido a cambios extremos como calor, frío, sequía, precipitaciones, uso de pesticidas, agricultura intensificada, quebrantamiento de bosques, urbanización, ruido, etc (González, 2018).

Aire

La contaminación atmosférica es la concentración de contaminantes en el aire, durante un determinado tiempo como producto de actividades antropogénicas y de algunos procesos naturales que causan esta contaminación que a la vez producen daños

en los seres vivos, por lo tanto, en esta monografía el concepto calidad del aire se refiere a qué tan contaminado se encuentra el aire y por ende qué tan apropiado es para vivir en este ambiente (Rodríguez *et al.*, 2011); esta contaminación en el planeta comenzó hace millones de años a partir de erupciones volcánicas, descomposición de materia orgánica e incendios forestales, enseguida y a medida que avanzaron los sistemas agrarios, el uso de madera se incrementó aumentando así también los niveles de contaminación generada a partir de la quema de combustibles vegetales (carbón); seguidamente llegó la revolución industrial donde la contaminación del aire aumento excesivamente, a consecuencia de la alta gama de actividades humanas tales como la minería, calefacción, metalurgia, ferrocarriles, etc., junto con el uso del petróleo y sus derivados (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2007).

La contaminación atmosférica disminuye la calidad de vida notablemente atacando a las personas más vulnerables que son los adultos mayores y niños menores de cinco años, aumentando así la frecuencia de enfermedades respiratorias, en Colombia el costo de salud por contaminación del aire según estudio realizado por el Banco Mundial en el año 2012 corresponde al 0.8% del Producto Interno Bruto (PIB) y al 1.1% del año 2009. Generalmente los problemas de contaminación del aire se derivan y generan en sitios urbanos con zonas industriales y es precisamente aquí donde se encuentra concentrada la mayoría de la población, razón por la cual resulta esta contaminación ser una de las mayores prioridades por los entes gubernamentales y ambientales combatir esta problemática que cobra la vida de muchas personas (IDEAM, 2012), según la OMS (2014) la contaminación atmosférica produce 7

millones de muerte al año a nivel mundial y el 88% de muertes se presenta en países con ingresos medios y bajos, por ende son cifras que alarman que la contaminación atmosférica es un riesgo a nivel mundial que se debe mitigar, por tal razón la importancia de buscar nuevas medidas o alternativas para evaluar y mejorar la calidad del aire.

El aire es indispensable para la gran mayoría de seres vivos, el hombre inhala en promedio 22.000 veces al día, lo que quiere decir que sin aire se induce a la muerte en cinco minutos, de aquí la importancia de la calidad del aire. Pero el hombre en su afán de buscar la parte económica viene contaminando la atmósfera a través de sus actividades industriales y agrícolas, lo peor de todo, sin tomar ninguna medida de control o prevención efectiva para evitar la emisión de contaminantes a la atmósfera (Cuadrado, 2011). La contaminación atmosférica a largo plazo tiene consecuencias perjudiciales en la salud humana y en aquellos otros organismos vivos que presentan sensibilidad ante la presencia de sustancias contaminantes. Por consiguiente, la educación y conciencia ambiental es el primer paso para tener hábitos saludables para con el medio ambiente, además de promover a toda costa un desarrollo más sostenible con el uso de energías de manera responsable, para lograr reducir significativas cantidades de emisiones contaminantes (Martínez, 2010).

Gracias a los bioindicadores de la calidad del aire es posible conocer los niveles de contaminación atmosférica presentes en el ambiente, ya que responde a la presencia de contaminación, de esta manera proporcionan información y datos que evalúan la calidad del aire, siendo posible conocer los daños y riesgos que representa la

contaminación atmosférica no sólo para los organismos bioindicadores sino para otros seres vivos de esa misma zona o ecosistema (Anze *et al.*, 2007).

La gran mayoría de estudios con bioindicadores han enfocado sus metodologías y resultados en base a la concentración de contaminantes, pero cabe resaltar que cada efecto o cambio en cada bioindiator está directamente relacionada con la composición de los contaminantes presentes en el medio ambiente, dado que algunas sustancias pueden no tener una composición tan tóxica y en este caso no tendría el mismo efecto que si ocurriera todo lo contrario, es decir, que la contaminación tenga una composición supremamente tóxica o fuerte como por ejemplo los metales pesados cuya concentración y presencia en el ambiente generan problemas de salud y alteración en los seres vivos, así mismo, puede que la concentración sea baja pero debido a la composición del contaminante puede ser muy perjudicial, por ende estas son las causas por la cual los bioindiaadores reaccionan (Santoni & Lijteroff, 2006).

En el capítulo 3 se abordará de una manera más detallada cada grupo bioindicador junto a sus especies bioindicadoras de la calidad del aire que fue empleada y hallada en los diferentes estudios Nacionales y extranjeros

Especies bioindicadoras de la calidad del aire		
Grupo de organismos	Especie	Referencia
	<p><i>Parmotrema austrosinense, Punctelia sp, Heterodermia albicans, Lobariaceae sp, Heterodermia albicans.</i></p> <p><i>Candelariella solediosa Poel & Reddi, Pixine Petricola Nyl, Canoparmelia s, Heterodermia speciosa, Normandina pulchella, Parmotrema austrosinense, Cladonia sp, N. pulchella, H. speciosa Trev, Canoparmelia sp, Parmotrema austrosinense.</i></p> <p><i>Lecanoraceae, Thelotremataceae, Arthoniaceae, Pertusariaceae, Coccocarpiaceae, Lobariaceae, Parmeliaceae y Physciaceae.</i></p>	<p>(Simijaca <i>et al.</i>, 2014).</p> <p>(Jaramillo & Botero, 2010).</p> <p>(Valois & Mosquera, 2014).</p>

<p>Líquenes</p>	<p><i>Candelaria concolor, Chrysothrix sp, Flavopunctelia flaventior, Parmotrema sp, Punctelia sp y Physcia sp.</i></p> <p><i>Fraxinus americana, Punctelia subrudecta, Flavopunctelia flaventior, Phaeophyscia, la Lepraria ecorticata, Physcia undulata, Teloschistes chrysophthalmus, Hyperphyscia syncolla.</i></p> <p><i>Parmelia caperata, Tillandsia recurvata.</i></p> <p><i>Hypotrachina Physcioides, Usnea subfloridana, Stereocaulon ramulosum.</i></p> <p><i>Evernia prunastri, Parmelia sulcata, Physcia aipolia, Xanthoria parietina.</i></p> <p><i>Parmelinopsis minarum, Parmelina tiliácea, Parmotrema stuppeum, P. austrosinense, Lepraria umbricola y L. conizaeoides.</i></p>	<p>(Figueroa, 2015).</p> <p>(Gonzales <i>et al.</i>, 2016).</p> <p>(Ghirardi <i>et al.</i>, 2011).</p> <p>(Anze <i>et al.</i>, 2007).</p> <p>(Fernández <i>et al.</i>, 2007).</p> <p>(González <i>et al.</i>, 2006).</p>
------------------------	---	--

	<p><i>Hyperphyscia cf. Pyvithrocardia, Physcia cf. Lopezii,</i> <i>Chrysothrix candelaris</i></p> <p><i>Candelaria concolor, Hyperphyscia adglutinata, Mayrhofer & Poelt, Hyperphyscia adglutinata (Flörke), Physcia caesia, Physcia stellaris, Leptogium azureum, Candelaria concolor (Dicks.), Leptogium milligranum Sierk, Physcia aipolia, Heterodermia granulifera (Ach.) W.L. Culb, Parmotrema crinitum (Ach.), M. Choisy (Cohn, 2014). Ramalia sp, Parmotrema sp.2.</i></p> <p><i>Flavoplaca austroctrina, Caloplaca cinnabarina, Punctelia hypoleucites, Dirinaria picta, Hyperphyscia viridissima, Parmotremapilosum, Xanthoparmelia microspora, Punctelia borreri, Usnea amblyoclada.</i></p> <p><i>Punctelia graminicola, Parmotrema tinctorum, Lecanora pallida, Dirinaria picta y Canoparmelia texanase, Physcia aipolia,</i></p>	<p>(Quispe <i>et al.</i>, 2015).</p> <p>(Llatance, 2017).</p> <p>(Lavornia, 2014).</p>
--	--	--

	<p><i>Parmotrema praesorediosum, Dirinariapicta, Canoparmeliatexana, Puncteliagraminicola.</i></p> <p><i>Phaeophysci orbicularis, Physconia distorta, Physcia adscendens, Physconia grisea, Xanthoria parietina, Evernia Prunastra, Parmelia sulcata, Ochrolechia pallescens, Physcia tenella.</i></p> <p><i>Pyxine sorediata, Phaeophyscia hispidula, Flavoparmelia caperata, Pyxine sorediata, Phaeophyscia hispidula.</i></p> <p><i>Physcia alba sp.</i></p>	<p>(Azevedo <i>et al.</i>, 2008).</p> <p>(Stamenković <i>et al.</i>, 2010).</p> <p>(Bajpai <i>et al.</i>, 2014).</p> <p>(Estévez <i>et al.</i>, 2011).</p>
<p>Abejas</p>	<p><i>Apis Mellifera</i></p>	<p>(Meléndez, 2015).</p>

Plantas	<p><i>Acacia melanoxylon, Hedera hélix, Populus balsamifera, Lolium multiflorum.</i></p> <p><i>Vicia faba</i> (haba), <i>Raphanus sativus</i> (rábano).</p> <p><i>Petunia hybrida cv, Nicotianay Urtica, Amistad blanca, Gladiolo cv.</i></p> <p><i>Tradescantia cerinthoides, Tradescantia pallida ssp. Purpurea.</i></p>	<p>(Anze <i>et al.</i>, 2007).</p> <p>(Cortés & Calderón, 2015).</p> <p>(Klumpp <i>et al.</i>, 1993).</p> <p>(Anze <i>et al.</i>, 2007).</p>
	<p><i>Grimmia donniana Sm, Grimmia elongata Kaulf, Grimmia fuscolutea Hook, Hedwigia ciliata (Hedw.) P, Hedwigidium integrifolium (P. Beauv.) Dixon, Streptocalypta lorentziana, Synthrichia lacerifolia, Synthrichia laevipila, Grimmia elongata, Andreae rupestris, Leptodontium synthrichioides, Lepyrodon</i></p>	<p>(Mejía & Castro, 2018).</p>

✦ Musgos

tomentosum, Leptodontium flexifolium, Macromitrium punctatum, Racomitrium crispipilum, Cryphaea ramosa, Grimmia fuscolutea, Synthrichia Laevipila, Anomobryum postratum, Hedwigia ciliata, Leptodontium viticulosoides, Pleurochaete squarrosa, Synthrichia lacerifolia, Fissidens weirii, Groutiella chimborazensis, Brachytheceium rutabulum, Brachymenium klotzchii, Chryso-hypnum elegantulum, Erythrodontium longisetum, Erpodium beccari, Pseudocrossidium replicatum y Fabronia ciliaris.

Brachytheceium sp, Bryum argenteum, Bryum billarderi, Bryum procerum, Cryphaea patens, Entodon abbreviatus, Fabronia ciliaris, Fissidens angustelimbus, Grimmia trichophylla, Leucodon sp, Neckera sp, Orthotrichum aequatorem, Orthotrichum diaphanum, Orthotrichum pycnophyllum, Zygodon obtusifolius, Bryoerythrophyllum jamesonii, Didymodon australasiae, Didymon rigidulus, Icmadophilis, Leptodontium flexifolium, Campylopus pilifer, Symblepharis vaginata,

(Zepeda *et al.*, 2014).

	<p><i>Entodon abbreviatus, Fabronia ciliaris. Fissidens angustelimbatus, Grimmia trichophylla, Hedwigidium integrifolium, Homomallium mexicanum, Hypnum cupressiforme, Platygyriella pringlei, Pylaisia falcata, Leskea angustata Taylor, Bryoerythrophyllum jamesonii, Didymodon australasiae, Didymon rigidulis, Leptodontium flexifolium, Leptodontium citiculosoides, Rhexophyllum subnigrum, Syntrichia amphidiacea, Syntrichia fragilis, Syntrichia pagorum, Sematophyllum subpinnatum, Sematophyllum subsimplex, Thuidium delicatulum.</i></p> <p><i>Leskea angustata, Fabronia ciliaris, Physcomitrella patens.</i></p> <p><i>S. amphidiacea, B. argeteum, Tortella humilis, Pottiaceae, tortula sp, Tortula sp, Tortella humilis.</i></p> <p><i>Saniona Uncinata.</i></p>	<p>(García <i>et al.</i>, 2016)</p> <p>(Toledo <i>et al.</i>, 2014).</p> <p>(Sarmiento, 2013).</p>
--	--	--

<p>✦ Clavel de aire</p>	<p><i>Tillandsia capillaris, Tillandsia usnoideas, T. Capillaris,</i> <i>Lolium multiflorum, T. usneoides L.</i></p> <p><i>Tillandsia recurvata.</i></p>	<p>(Cuadrado, 2011).</p> <p>(Mejía <i>et al.</i>, 2018).</p>
<p>Aves</p>	<p><i>Turdus fuscater, Zonotricbia capensis, Zenaida auriculata,</i> <i>Colibri coruscans, Carduelis psaltria, Sicalis luteola bogotensis,</i> <i>Tbraupis episcopus, Tbraupis episcopus, Tyranus melancholicus,</i> <i>Tbraupis palmarum, Bubulcus ibis, Casmerodius alba, Butorides striatus,</i> <i>Podilymbus podiceps, podiceps dominicus, Popbirio marlinia,</i> <i>Gallinula cbloropus, Rallus semiplumbeus, Gallinula melanops,</i> <i>Angelaius icterocephalus, forpus conspicillatus.</i></p> <p><i>Sicalis olivascens, Troglodytes aedon, Colibri coruscans,</i> <i>Catamenia analis, Colaptes rupicola, Patagona gigas, Turdus</i></p>	<p>(Osorio & Molina, 2009).</p> <p>(Villegas & Garitano, 2008).</p>

	<p><i>fuscater, Anairestes parulus, Leptasthebura aegithaloides, Phrygilus fruticeti, Muscisaxicola griseus.</i></p> <p><i>Passer domesticus italiae, Passer domesticus.</i></p> <p><i>Psoralea pubescens, Dunalia brachyacantha, Achyrocline satureoides, Columba livia, Falco sparverius, Buteo poecilochorous, Phalcoboenus megalopterus, Falco femoralis, Falco peregrinus, Anairetes parulus, Amazilia chionogaster, Colaptes rupicola, Sicalis Olivascens, Metriopelia ceciliae, Catamenia analis, Carduelis Xanthogastra, Colibri coruscans, Saltador aurantirostris, Patagioenas maculosa, Diglossa carbonaria, Carduelis uropygialis, Thraupis sayaca, Thraupis bonariensis, Pygochelidon, Psilopsiagon, Leptasthenura aegithaloides, Asthenes dorbignyi, Ochthoeca oenanthoides, Cinclodes fuscus, Ochtorhyncgus ruficaudus, Phygilus fruticeti, Leptasthenura fuliginiceps, Poospiza bilivariana, Muscisaxicola griseus, Geossitta punensis, Catamenia inornata,</i></p>	<p>(Parra, 2014).</p> <p>(Villegas <i>et al.</i>, 2008).</p>
--	---	--

	<p><i>Poospiza hypochondria, Minus dorsalis, Ochthoeca leucophrys, Lesbia nuna, Knipolegus aterrimus, Geositta rufipennis, Sicalis flaveola, Gnorimopsar chopi, Muscisaxicola maculirostris, Diglossa brunneiventris, Orochelidon murina, Oreotrochilus estella, Phrygilus unicolor, Phrygilus plebejus, Muscisaxicola plebejus, Muscisaxicola cinereus, Upucerthia, Leptasthenura.</i></p>	
--	---	--

Microorganismos	<p><i>Aspergillus sp, Penicillium sp, Aureobasidium sp, Curvularia sp, Fusarium sp, Cladosporium sp, Cladosporium, Tetraploa, Uredinales, Alternaria, Nigrospora, Curvularia, Cercospora, Helminthosporium.</i></p>	(Herrera <i>et al.</i> , 2003).
	<p><i>Rhizopus, Mucor, Curvularia, Penicillium, Aspergillus y Cladosporium, fungaceas, Actinomyces, Bacillus subtilis, Bacillus cereus, Micrococcus luteus, Micrococcus roseus, Streptococcus sp.</i></p>	(Valentín <i>et al.</i> , 2010).
	<p><i>Alternaria, Aspergillus, Cephalosporium, Cladosporium, Fusarium, Paecilomyces, Penicilium, Puhomyces, Trichoderma, Stachybotris, Trichotecium, Aurebasidium, Candida, Circinella, Epiccocum, Geotrichum, Helmimhosporium, Mucor, Nigrospora, Rhizopus, Rhodotorula, Cylindrocladium, Crysosporium, Drechslera, Diheterospora, Diplodia, Gillmaniella, Gliomastix, Gonatobotrium, Graphium, Hormodendrum, Humicola, Mycelia steril, Papularia, Oidiodemmdrom, Oedocephalum, Phoma, Papulospora, Rhinocладиella, Sepedonium, Scopuraliopsis, Stemphylium, Torula, Torulomyces, Trichurus, Ulocladium, Verticillium, Volutella.</i></p>	(Soriano <i>et al.</i> , 2002).
	<p><i>Trichoderma, Curvularia, Alternaria, Fusarium, Phoma, Penicillium, Aspergilus y Cladosporium.</i></p>	(Esquivel <i>et al.</i> , 2003).

Tabla 1. Organismos y especies bioindicadores de la calidad del aire.

Especies bioindicadoras de calidad del aire

Los métodos fisicoquímicos son utilizados para evaluar la calidad del aire, sin embargo no brindan del todo una información completa, ya que no demuestran de igual manera la visibilidad de los efectos generados por los contaminantes sobre organismos vivos, siendo esto de gran importancia al momento de implementar los bioindicadores de la calidad del aire para demostrar el grado de contaminación en determinado lugar o zona, de esta manera, se convierten en un complemento fundamental de los métodos fisicoquímicos (Anze *et al.*, 2007).

Por lo tanto, ofrecen información sobre los riesgos para otros seres vivos, hábitats y ecosistemas.

Líquenes

Una definición con la que están de acuerdo la mayoría de los liquenólogos y fue aprobada por la Asociación Internacional de Liquenología en el año 1982, es: “Un liquen es una asociación entre un hongo (micobionte) y un alga cianofita o clorofita (fotobionte), de la que resulta un talo estable de estructura específica” (Carballal, 2006). Sin embargo, en el 2016 se descubrió que los líquenes conforman una relación tripartida de dos micobiontes y un fotobionte, es decir, que adicional al hongo habitualmente descrito, se suma una levadura basidiomiceto (Spribille *et al.*, 2016). A pesar de ello, desde el punto

de vista de su clasificación sistemática, los líquenes son clasificados acordes al primer micobionte descrito, es decir que se estudian desde el reino fungi, bajo la denominación de hongos liquenizados (Valois & Mosquera, 2014).

Los líquenes han sido utilizados bastante en estudios para evaluar la calidad del aire, ya que además de ser bioindicadores son bioacumuladores de contaminantes atmosféricos (Ghirardi *et al.*, 2011). Los líquenes son utilizados para conocer la salud ambiental de la tierra, en varios ámbitos tales como: evaluar la calidad atmosférica ya que los líquenes reaccionan a cambios o alteraciones ambientales, también contribuyen en la determinación de cambios climáticos ocasionados por radiación UV, también son útiles en la continuidad ecológica de bosques (Méndez *et al.*, 2011). Según su apariencia, los líquenes se pueden clasificar en tres grupos: crustáceos o costrosos (aquellos con aspecto de costra delgadas sobre el sustrato), foliosos (talos laminares con forma de hoja, lóbulos y divisiones variables, unidas fuerte o débilmente al sustrato) y fruticosos (con un talo de apariencia ramificada o diminuto arbusto) (Cepero de García *et al.*, 2012).

A pesar de que los líquenes son resistentes, muchos de ellos no tienen la capacidad de soportar niveles altos de contaminación, debido a su sensibilidad a las alteraciones en la calidad del aire, dada esta situación se presenta dos clases de líquenes, los sensibles que siempre tienden a desaparecer y los tolerantes que tienden a incrementar sus especies. Otros factores como la lluvia ácida, gases, metales pesados y otros contaminantes afectan los líquenes (Ramírez *et al.*, 2017). Por otra parte, los líquenes también son fijadores de nitrógeno atmosférico, esto debido a las cianobacterias que participan en la asociación con el hongo. Esta acción es muy reverente en el planeta dado que son escasos los organismos

que tienen la capacidad de fijar nitrógeno, elemento fundamental en la formación de proteínas (Morales *et al.*, 2009).

Nylander en Luxembourg, París (1866) fue el primero en observar en su jardín que los líquenes sirven como bioindicadores de la salud del aire y desde entonces continuaron evaluando toda la comunidad de líquenes, convirtiéndose en uno de los bioindicadores más utilizados para evaluar y monitorear la calidad del aire. Los líquenes se convierten en coleccionistas en su talo de contaminantes presentes en el aire de su ambiente, tales como: metales, contaminantes orgánicos y radionucleidos (Bargagli, 2016). Los líquenes resultan ser útiles como una alternativa o complemento de los métodos fisicoquímicos, estableciendo los impactos de contaminación sobre los seres vivos del todo el ecosistema (Gonzales *et al.*, 2016). Actualmente ya es reconocido su uso en países avanzados en ciencias ambientales como una gran alternativa no sólo fácil de implementar sino económica, con su gran potencial para complementar el método tradicional de equipo, material y mano de obra que generan altos costos. Además frente al monitoreo fisicoquímico proporciona mayor información sobre el impacto que tienen el estrés ambiental, lo que permite observar de manera muy temprana los efectos convertidos en daños sobre estos seres vivos (Jaramillo y Botero, 2010).

Taxonomía: Alrededor del mundo existen en promedio unas 15.000 especies, pero periódicamente se publican nuevas especies, esta diversidad de líquenes tiene muchas formas, tamaños y colores, además de las múltiples características microscópicas, entre las numerosas especies han sido reconocidas sustancias químicas con propiedades farmacéuticas, alimenticias, tintes, cosmetológicas, entre muchos otros (Morales *et al.*,

2009). Las categorías sistemáticas de los líquenes se delimitan de la siguiente manera: como primera medida se encuentran las familias que se basa en la estructura de los ascos, el desarrollo de tejidos estériles alrededor de los ascos, el color y forma de las esporas, tipo de alga, contenido químico y estructuras vegetativas; en segundo lugar están los géneros y se identifican por su estructura anatómica, la ontogenia de los ascocarpos y el contenido químico, pero también se puede identificar por su forma de crecimiento, el color, forma de las esporas y el tipo de ficobionte. Luego están las especies, las cuales se identifican por la estructura y tamaño de las esporas en las formas crustosas y la presencia de soledios, tomento, isidios, y cefalodios en las formas foliosas y fruticulosas (Llatance, 2017). Por ejemplo, el líquen de la especie *Heterodermia leucomela* (L.) tiene una forma biológica tipo folioso, su cara superior es de color gris y blanco en la parte inferior, no tiene córtex inferior, tampoco tiene rizinas, apotecios ni soledios, se desarrolla y vive sobre musgo (Ramírez, 2018).

Ecología: Los líquenes pueden vivir en todos los ecosistemas terrestres desde el clima más caliente hasta el clima más frío, cabe resaltar que existe variedad de especies que se distribuyen por los diversos sitios de la tierra, por lo que cubren un 8% de la superficie terrestre (Morales *et al*, 2009). Las comunidades liquénicas tienen algunos requerimientos ecológicos limitados y esto los convierte en seres sensibles a cambios en el medio ambiente y ecosistema, por tal razón son utilizados para el biomonitoreo en diferentes ámbitos de alteración en ecosistemas, por ejemplo, con contaminantes en el ambiente: hidrocarburos clorinados, metales pesados, lluvia ácida, dióxido de azufre, eutrofización por amonio y radionucleidos; en cambios extremos del tiempo atmosférico: como los niveles de agua y radiación ultravioleta; y por la continuidad ecológica: como la

estabilidad de superficies, bosques deciduos, bosques de coníferas y cambios ocasionados por el fuego (Hawksworth *et al.*, 2005). Por ejemplo, en el caso de la especie *Heterodermia leucomela* (L.), se desarrolla y crece sobre los 200 a 3500 metros sobre el nivel del mar en Perú en sitios no cercanos al mar, ni tampoco en grandes bosques; otro tipo de especies si crecen en suelos, piedras y plantas vasculares (Ramírez, 2018).

Biología: Los líquenes están formados entre un hongo (micobionte) y un alga verde o una cianobacteria (fotobionte), en esta asociación el hongo se encarga de proteger el alga de la desecación facilitándole agua, nutrientes y sales minerales, además de protegerlo de radiaciones ultravioleta y el alga por contener clorofila realiza la fotosíntesis y le brinda carbohidratos que nutren al hongo; su reproducción puede ser sexual, siendo esta la más frecuente, en este caso el micobionte u hongo es el encargado de producir ascoporas por medio de estructuras llamadas peritecios y apotecios a través del proceso meiótico, para luego ser dispersadas mediante el agua y viento hasta encontrar nuevas de células de fotobionte que sean compatibles y puedan dar origen a un nuevo liquen (Franco, 2016). La reproducción asexual es llevada a cabo mediante la creación de conidios mitóticos en el hongo, estas estructuras son picnidios que poseen un ostilo o apertura en la parte superior para dejar al aire libre conidios, los cuales al encontrar un hábitat favorable germina y produce hifas de micobionte para posteriormente buscar un fotobionte; por último, está la reproducción vegetativa, donde isidios y soredios hacen agrupaciones con células e hifas provenientes de la alga o cianobacteria que han sido formadas en la médula del liquen donde posteriormente son expulsadas al aire por medio de agujeros llamados soraliis (Morales *et al.*, 2009).

Los líquenes por ser una asociación entre hongo y un alga se convierte en un concepto más biológico que taxonómico, estos hongos pertenecen al reino fungi. El hongo filamentosos pueden ser del filo Ascomycota o Basidiomycota, la levadura es del filo Basidiomycota y en cuanto a las algas estas pueden ser cianofitas (bacterias) o clorofitas pertenecientes al reino plantae (Llatance, 2017).

Efecto bioindicador: Los líquenes son utilizados en monitoreos por su alta sensibilidad a gases contaminantes o tóxicos que afectan el ambiente y por su bioacumulación de metales pesados, además de su fácil muestreo permite evaluar sitios amplios de manera muy económica, de hecho en varias ciudades del mundo están llevando a cabo estudios e investigaciones para identificar métodos que contribuyan en la evaluación de la calidad del aire que tienen sus calles y rutas con diverso tráfico vehicular (Ghirardi *et al.*, 2011). Por otra parte, los líquenes pueden ser utilizados ya sea como biomonitores o bioindicadores de dos formas distintas: a) con el mapeo del total de especies liquénicas de un determinado lugar y b) muestreando las especies individualmente para evaluar la bioacumulación de contaminantes y observar sus cambios. Cabe resaltar que la eficiencia de las familias liquénicas depende de su composición biológica: no tienen raíz, no poseen estructuras que los protejan de sustancias externas del ambiente, no tienen la capacidad de eliminar los contaminantes, no tienen sistemas de conducción, existen en ambientes bien definidos, crecen muy lento y viven 100% de la atmósfera para su metabolismo (Santoni & Lijteroff, 2006).

Los líquenes tienen la capacidad de reaccionar a diversas amenazas tóxicas de contaminación, por ejemplo cuando hay presencia de SO₂ produce alteración en estas

especies liquénicas al punto de que la corteza de los árboles se vuelven ácidas; cuando cae lluvia con eutrofización produce cambios en los líquenes y esto sirve como bioindicadores de radiación ultravioleta (Llatance, 2017), en otros casos son tolerantes al contaminante y estos efectos bioindicadores los destaca como excelentes bioindicadores, ya que la reacción o síntomas que presentan son claramente visibles ante la presencia de cierta cantidad de tóxicos en el ambiente hábitat. También son acumuladores de partículas de estos contaminantes en sus tejidos, normalmente los líquenes viven sobre otro ser como árboles, piedras, techos, etc sin ser maleza para estos (epífitos) y son considerados los mejores bioindicadores para evaluar la calidad del aire, ya que por ejemplo los que habitan en los árboles que son la gran mayoría, la corteza les proporciona un sustrato homogéneo que les permite ser constantes (Mares, 2017).

Las razones por las que son utilizados con éxito los líquenes por su efecto bioindicador son: por su ausencia de cutícula que los protege, estos absorben tanto nutrientes como contaminantes provenientes de la atmósfera; por ser ubicuos, es decir, que se encuentran en muchos lugares, están aumentando en las partes urbanas y esto se debe a la disminución de las concentraciones del contaminante que más los afecta (SO_2). Son longevos, es decir que pueden durar por mucho años y esto les permite estar expuestos por largos periodos de tiempo, por lo que proporcionan cambios en el ambiente crónicos; por sus simbiontes ya que si alguno falla tanto el hongo como el alga mueren y por ser perennes o tener un lento crecimiento puede ser muestreado durante todas las épocas del año, por estas razones las comunidades liquénicas son muy interesantes y atractivas para utilizarlas como bioindicadores ya que el hecho de que absorben y viven de los nutrientes de la atmósfera es un gran ventaja como bioindicador (Hawksworth *et al.*, 2005).

Los líquenes que se seleccionan como bioindicadores en estudios para evaluar la calidad del aire de preferencia son aquellos que demuestran sensibilidad a la contaminación, con el fin de que ofrezcan resultados tan pronto detecten alguna alteración en el ambiente. Es importante tener en cuenta que tienen limitación para estudios a corto plazo por ser perennes, es decir que tienen un crecimiento muy lento y esto los hace ineficientes cuando se requiere determinar la calidad del aire en periodos cortos de tiempo, pero combinado con su longevidad le confiere ciertas ventajas como bioindicador, ya que puede acumular ciertos contaminantes (Fernández, 2016).

Abejas

Las abejas son organismos ubicuos, con pelos que cubren su cuerpo, cumplen la función de atrapar sustancias o partículas cuando entran en contacto con ellas, son sensibles a contaminantes tóxicos y son perfectas bioindicadoras de la calidad del aire y en general ambiental ya que recorren casi un 100% de hábitats en el aire, suelo y vegetación por lo que terminan recolectando diversidad de sustancias en las colmenas (Sánchez, 2018). El monitoreo ambiental mediante el uso de colmenas de abejas no es muy común escucharlo ya que en la apicultura lo importante es la producción de miel, pero cuando las colmenas son utilizadas para fines ambientales, estas tienen el objetivo de permitir observar mejor su comportamiento y actividad biológica, ya que su función es recoger información por medio de las muestras que se toman de las abejas, de la cera, miel, el polen y propóleos. Las abejas tienen la destreza de detectar cualquier anomalía reaccionando en su comportamiento y biología, esto las denomina detectores ecológicos, por esto las abejas

son consideradas bioindicadoras de la degradación ambiental y han sido investigadas desde la década de los 70, en la actualidad siguen siendo investigadas y empleadas en estudios (Gorza, 2007).

La abeja *Apis Mellifera* tiene cualidades excepcionales que las convierte en excelentes bioindicadores de perturbaciones, esas cualidades son: la fácil cuantificación por ser tan conocida su taxonomía, son muy estudiadas por lo que se tiene muchos datos sobre su comportamiento, biología, ecología y fisiología. Es una especie abundante y responde a diversas alteraciones ambientales, con los metales pesados son tolerantes acumulándolo en sus cuerpos, en cuanto a los insecticidas y plaguicidas presentan alta sensibilidad al punto de provocarles la muerte. Son fáciles de manejar por ende la toma de muestras se realiza de forma sencilla, también proporcionan información sobre los riesgos para otros seres del mismo ambiente, por otra parte, tienen importancia tanto ecológica como económica por ser grandes polinizadores y esto permite tener seguridad de alimento para todos los seres vivos de la tierra (Gutiérrez, 2016).

Actualmente la contaminación ambiental ha venido deteriorando ecosistemas, razón por la cual es necesario evaluarlos con urgencia e implementar medidas de mitigación. Por otra parte, las abejas son insectos que cumplen la función de bioindicadores en los ecosistemas, además prestan el servicio de polinización siendo esta una importante labor para todos los seres vivos, ya que vivimos gracias a esta importante labor de las abejas (Meléndez, 2015).

Ecología: Las abejas tienen la capacidad de vivir en cualquier ambiente natural y domésticos en colonias de enjambres, pero siempre prefieren los bosques, jardines y prados

donde las plantas tengan flores en abundancia, a pesar de que habitan en todos los continentes existe una excepción y es la Antártica; las abejas forman sus nidos en agujeros de árboles para protegerse de los depredadores, en el caso de las abejas domésticas viven en colmenas y panales realizados por el hombre, ya que han sido domesticadas para la producción y comercialización de miel, hoy en día se encuentran en todo el mundo y en diversos hábitats (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2009). Las abejas europeas viven en climas templados puesto que necesitan mantener cierta temperatura en el interior de la colmena para lograr su supervivencia; las abejas de clima frío se adaptan a su ambiente sin ningún inconveniente, estas abejas crean un panal aislado en el interior donde coleccionan miel para la temporada de invierno, las abejas que tienen sus hábitats en zonas tropicales tienen sus enjambres con una temperatura constante entre los 90 y 95°C y dependen totalmente de la abundancia o escasez de los alimentos sin importar los factores ambientales, teniendo en cuenta que se adaptan a cualquier tipo de clima es lo que las ha convertido en las reinas de la polinización, conservando así la biodiversidad de vegetación y ecosistemas en el mundo (Gennari, 2019).

Biología: Las colonias de abejas están conformadas por 3 rangos sociales, está la abeja reina, seguidamente están los zánganos o machos y están las abejas obreras, el cuerpo está dividido en abdomen, tórax y cabeza donde tienen dos antenas, estas son muy sensoriales no solamente al tacto sino también al olfato, por lo que tienen la capacidad de detectar a larga distancia sustancias químicas, aromas florales, presencia de néctar, polen y feromonas, también aprecian el olor de su colmena y detectar la presencia de posibles depredadores. Tienen ojos compuestos por múltiples estructuras llamadas omatidios y dentro de los ojos compuestos tienen otros simples que son pequeños foto receptores,

siendo estos los que permiten detectar la presencia y la dirección de la luz mejorando así la precisión del vuelo, estos insectos diferencian los colores amarillo, azul y negro, los demás colores los ven en escalas grises, en la cabeza se encuentra la boca y mandíbulas las cuales usa para agarrar, morder y labrar la cera; el tórax está constituido por la corbícula con pelos que cargan polen u otras sustancias, tienen 2 pares de alas y 3 pares de patas, además de los orificios respiratorios; por último se encuentra el abdomen donde tienen una cavidad para transportar el néctar de las flores, agua y otros líquidos a los que sea posible que las abejas le incorporen enzimas salivales para posteriormente ser llevados al interior de las colmenas (Cánovas, 2009). Por otra parte, las reinas son reconocidas por su tamaño y permanece en el sitio de cría puesto que es la única hembra fértil dentro de la colonia; las abejas producen feromonas que provocan ciertos comportamientos concretos en otros insectos de la misma especie, cuando son vírgenes las reinas atraen a los zánganos para procrear, en cuanto a los zánganos o machos son muy parecidos a las abejas obreras, ellos nacen de huevos que no fueron fecundados (haploides), este mecanismo se llama partenogénesis, en ciertas ocasiones por diversos factores climáticos y de consanguinidad pueden nacer machos de huevos fecundados (diploides). Por lo tanto, la cantidad de zánganos siempre dependerá de las condiciones de la colonia y las abejas obreras si nacen de abejas fecundadas, estas tienen un tiempo de vida entre 30 y 60 días dependiendo de la cantidad de trabajo que realicen, puesto que las abejas tienen y cumplen diversas funciones de acuerdo con la edad de la abeja y la necesidad de cada colmena como construir y reconstruir el nido, ventilar, limpiar, pecoradoras y guardianas (Gennari, 2019).

Efecto bioindicador: Las abejas se han convertido en una herramienta de monitoreo único por su efecto bioindicador acumulando los contaminantes en su cuerpo y

en toda la colmena (cera, polen, propóleos y miel). El hecho de ser bioindicadores biológicos de alteraciones ambientales tiene que ver por su amplio vuelo que tienen aproximándose a los 7 kilómetros cuadrados con 10.000 abejas realizando salidas diarias de sus colmenas (Gorza, 2007). Las abejas son muy sensibles a químicos que se utilizan en la agricultura respondiendo de dos maneras, una, acumulando residuos en sus organismos y otra es que simplemente no resisten dependiendo del nivel de contaminación y mueren, esto los convierte en biosensoras del medio ambiente (Baldi *et al*, 2014).

Las colmenas de abejas han sido utilizadas para bioindicar cambios de biodiversidad y cambio climático, evaluar la calidad ambiental a raíz del uso de plaguicidas y presencia de partículas de material particulado (PM, por sus siglas en inglés) ya que estas partículas están presentes en el aire, se adhieren a su cuerpo o en el peor de los casos son ingeridas. La presencia, evaluación y acumulación de metales pesados detienen y evalúan isótopos radioactivos por ser tolerantes a ellos y a la vez acumularlos, por eso la miel y el polen se convierten en indicadores ya que son los que pueden dar a conocer todo los contaminantes presentes tales como la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), de SO₂, compuestos orgánicos volátiles y semivolátiles. También indican la presencia de microorganismos ya que en su cuerpo velludo se adhieren diversidad de microorganismos y sustancias patógenas muchas veces derivadas de las plantas; también contribuyen evaluando el impacto que generan los cultivos transgénicos sobre la vida de otros polinizadores (Gutiérrez, 2016).

Según Claudio Porrini, una colmena en promedio tiene 40.000 abejas y unas 10.000 abejas cada una en el día visita mil flores, por lo que cada colmena realiza millones de

micro muestras diariamente, esta acumulación de contaminantes generan cambios en su vuelo, en su color de sus tejidos y al mismo tiempo degeneración celular, estas respuestas permite analizar y diagnosticar alteraciones ambientales y las abejas han demostrado ser bioindicadoras adecuadas para utilizarlas por su capacidad para vigilar y responder a cambios ambientales. Estudios en Francia las han utilizado para analizar el nivel de contaminación por metales pesados y HAP en el medio ambiente, también han sido utilizadas para manifestar la presencia de radioisótopos en el aire posterior a la catástrofe nuclear que ocurrió en Chernóbil en 1986 (Laurie, 2019). La especie *Apis mellifera* por años la han utilizado para el monitoreo de contaminación ambiental, así como el rastreo de metales pesados y contaminantes versus desechos industriales en zonas urbanas y rurales los efectos de pesticidas (Meléndez, 2015).

Taxonomía: Las abejas son seres esenciales para nuestra supervivencia en el planeta ya que son los polinizadores más grandes que tienen la naturaleza, los científicos hasta el momento han nombrado alrededor de 20.000 especies en todo el planeta, sin embargo, la especie *Apis mellifera* es la más acogida por ser la abeja polinizadora más abundante por la rapidez para reproducirse. Además es la especie más distribuida geográficamente y esto la hace eficaz para medir y evaluar la salud de zonas urbanas, además de ser productora de miel dulce y viscosa, pero también existen las abejas silvestres y nativas (National Geographic España, 2019).

Las abejas por su abundancia de familias, su variedad de géneros y especies permiten la distribución en todos los países, además de su facilidad de recolección y monitoreo es lo que les permite ser bioindicadores de la calidad del aire y medio ambiente

en general, las abejas tienen 3 tipos de individuos está la reina, obreras y zánganos, pertenecen al reino Animalia, del filo *Arthropoda* que significa que tienen patas articuladas, clase *insecta* por ser hexápodos, orden *Hymenoptera* por sus alas membranosas, con un suborden *Apocrita* por tener una parte que separa su tórax y cabeza del abdomen y pertenece a la superfamilia *Apoidea* por su función recolectora de polen y néctar, familia *Apidae* por tener estructuras o cepillos tibiales recolectoras de polen, subfamilia *Apinae* donde según su comportamiento están las solitarias, gregarias y sociales, su tribu es *Meliponini*, algunos géneros son *Paratrigona*, *Melipona*, *Geotrigona*, *Plebeia*, *Scaptotrigona*, *Tetragonisca*, etc., algunas especies son *Scaptotrigona jujuyensis* y *Tetragonisca fiebrigi* (Gennari, 2019). A su vez se subdividen según su reproducción en abejas africanas o con aguijón que pertenecen a la especie *Apis mellifera* y están las abejas sin aguijón o nativas de los géneros *Melipona* y *Trigona*; en diversas partes del mundo han tenido en cuenta abejas de diferentes grupos taxonómicos usadas como bioindicadoras como euglosinos (*Euglossini*), cortadoras de hojas (*Megachilini*), recaudadoras de aceites (*Centridini*), abejas carpinteras (*Xylocopini*), abejorros (*Bombini*) y meliponinos (*Meliponini*). Las abejas de las orquídeas o Euglossini sólo tienen presencia en el continente Americano, los machos son especialistas en polinizar especies de orquídeas, su tamaño es grande y sus colores son bastante llamativos como azul, morado metálico, verde, son buenos bioindicadores por su sensibilidad a perturbaciones agrícolas, por ejemplo en los cambios de suelo ya que pierden plantas que tienen orquídeas y son su fuente de alimentación, algunas veces pierden sus nidos y pueden perder la vida en algunos casos, esta desaparición de abejas permite evaluar el deterioro de hábitats; las abejas sin aguijón se reconocen 500 especies en el mundo, hacen sus colmenas en huecos de los

árboles, por lo que la riqueza de estas especies refleja el estado de conservación del ecosistema (Meléndez, 2015).

Plantas

El aire de los sitios urbanos de una u otra manera contiene ya sea bajas o altas concentraciones de contaminación en el ambiente y de varios tipos de contaminantes, por tal razón, se puede llevar a cabo un biomonitoreo haciendo uso de plantas sensibles a las partículas y demás contaminantes que reaccionan tan pronto sienten su presencia en su hábitat. Según el académico del Departamento de química y el director del laboratorio de Biomonitoreo CETAM dicen que el uso de plantas como bioindicadoras para evaluar la calidad del aire tiene muchas ventajas, entre ellas la eficiencia que tienen y sirven para el monitoreo de áreas amplias con largos periodos de tiempo, además de analizar la mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos por medio del nivel de trazas. También mencionan que en el laboratorio CETAM trabajan con una planta biomonitora llamada Tradescantia, esta planta ya ha sido validada internacionalmente por la International Programme on Chemical Safety (IPCS), donde le dieron el visto de su eficiencia, confiabilidad y rapidez para valorar ambientes contaminados, esta planta es tan eficaz que, al exponerla tan sólo 8 horas en la zona contaminada que se quiere estudiar o evaluar se evidencia cambios en la planta dando respuesta a la presencia de sustancias tóxicas. Por lo tanto, es cuestión de hallar plantas altamente sensibles a la contaminación para que sirvan como bioindicadoras, convirtiéndose en una herramienta de monitoreo de bastante utilidad para evaluar la salud ambiental (FONDEF, 2009). Las plantas bioindicadoras contribuyen en la sensibilización

de las personas sobre la contaminación del aire, puesto que es posible observar los efectos sobre las plantas que son seres vivos, sienten y demuestran las consecuencias de la contaminación atmosférica, de otra manera no fuera posible verlas, sobre todo en ciudades y zonas muy industrializadas (Temmerman *et al.*, 2001).

Taxonomía: La jerarquía taxonómica de las plantas es la siguiente: pertenecen al reino plantae con aproximadamente 300.000 especies de plantas en el mundo, división *phyta*, por ejemplo *Tracheophyta* pertenece a las plantas vasculares con un promedio de 250 especies, con orden *ales* (Hernández *et al.*, 2018), familia *aceae* (acanthaceae, aceraceae, actinidiaceae, agavaceae, aizoaceae, amaranthaceae, anacardiaceae, aquifoliaceae, apiaceae, apocinaceae, araliaceae, arecaceae, asteraceae, berberidaceae, betulaceae, bignoniaceae, brassicaceae, buddlejaceae, buxaceae, cactaceae, caesalpiniaceae, caprifoliaceae, caryophyllaceae, celastraceae, cicadaceae, cistaceae, convolvulaceae, cornaceae, crassulaceae, cupressaceae, cucurbitaceae, cyperaceae, dipsacaceae, eleagnaceae, ericaceae, escalloniaceae, euphorbiaceae, papilionaceae, fagaceae, geraniaceae, ginkgoaceae, guttiferae, hamamelidaceae, hippocastanaceae, iridaceae, juglandaceae, juncaceae, lamiaceae, lauraceae, liliaceae, lythraceae, magnoliaceae, malvaceae, meliaceae, mimosaceae, moraceae, myrtaceae, nyctaginaceae, oleaceae, onagraceae, paeoniaceae, passifloraceae, philadelphaceae-saxifragaceae, phytolaccaceae, pinaceae-abietaceae, pittosporaceae, platanaceae, poaceae-gramineae, polygonaceae, puniceae, quenopodiaceae, rhamnaceae, rosaceae, rubiaceae, rutaceae, salicaceae, sapindaceae, saxifragaceae, scrophulariaceae, simaroubaceae, solanaceae, sterculiaceae, tamaricaceae, taxaceae, taxodiaceae, tiliaceae, timelaceae, typhaceae,

ulmaceae, valerianaceae, verbenaceae, violaceae, vitaceae, etc), subfamilia *oide*, tribu *eeae*, género *poa* (Jardín Botánico, 2010).

Ecología: las plantas habitan y colonizan todo tipo de ambiente y hábitats, (montañosos, rocosos, húmedos, secos, inclusive algunas gustan de los desiertos) cada especie se adapta y habita en el clima y suelo más adecuado (Martínez, 1994), algunas plantas si prefieren climas cálidos junto con otros factores como atmósfera húmeda y suelos húmedos (Serrano, 2008). En el caso de las plantas epífitas se adaptan a ambientes y áreas boscosas sobre la las ramas y troncos de los árboles, preferiblemente buscando la cima para lograr recibir una mejor cantidad de sol, así mismo, de esta cantidad del luz es que depende las vías fotosintéticas, ecológicamente se relacionan con diversos forofitos de alta humedad atmosférica, puesto que estas plantas dependen de las precipitaciones para aprovisionarse de nutrientes y agua, por tal razón prefieren montañas y bosques húmedos, estas plantas tienen hojas terminadas en puntas facilitando así que se escurra el agua y deshacerse del exceso del agua (Sánchez *et al.*, 2003).

Biología: Las plantas son seres autótrofos, poseen célula vegetal con pared celular, sistemas bioquímicos y clorofila para el proceso de la fotosíntesis, en este proceso las plantas aprovechan la energía solar para obtener carbohidratos (CH₂O) y alimentarse, finalmente expulsan O₂ a la atmósfera. También tienen amiloplastos almacenadores de almidón, elaioplastos que almacenan grasas y cromoplastos responsables del pigmento de las plantas, también contiene una vacuola central llena de agua, por otro lado, las angiospermas y gimnospermas no tienen flagelos ni centriolos (Raven *et al.*, 2017). Las plantas absorben agua por medio de los pelos absorbentes presentes en las raíces, esta agua

llega por medio de conductos hasta sus hojas, este proceso tienen la función de regular la temperatura interna de la planta y así mismo, nutrirse de sales minerales presentes en el agua del suelo, finalmente el agua sobrante es eliminada en forma de vapor hacia la atmósfera, por medio de poros microscópicos llamados estomas situados en sus hojas, todo este proceso se llama transpiración. Otro proceso importante en las plantas es la respiración que se lleva a cabo en sus tallos y hojas verdes, este es un proceso bioquímico donde las plantas calcinan los CH_2O restantes que fueron obtenidos en la fotosíntesis y es necesario desecharlos luego de reconstruir sus órganos y tejidos necesarios para crecer y desarrollarse; a diferencia de las plantas briofitas, plantas hepáticas y musgos estas no tienen tejidos conductores, tallos ni hojas (Serrano, 2008).

Efecto bioindicador: Las plantas pertenecen a la cadena alimenticia, son organismos sésiles y sobre todo presentan sensibilidad ante la presencia de contaminantes tóxicos en el aire, reaccionando de una manera muy rápida, este efecto bioindicador las convierte en organismos perfectos para monitorear cambios medioambientales en zonas urbanas (Cortés & Calderón, 2015). Dan respuesta inmediata a la contaminación climática proporcionando así información sobre la presencia de contaminantes en el aire ambiental, cabe resaltar también que algunos contaminantes se encuentran en niveles muy bajos en el aire, por lo que son difíciles de cuantificar con el método fisicoquímico, a diferencia de las plantas que acumulan esos contaminantes a tal punto que facilitan su análisis. Las plantas sensibles expresan su daño por medio de cambios y daños en sus hojas, las plantas tolerantes sirven como acumuladoras de contaminantes, por lo tanto, las dos formas son herramientas que proporcionan información relevante para conocer los efectos y niveles de contaminación en determinado ecosistema (Temmerman *et al.*, 2001).

Musgos

Los musgos son plantas mayoritariamente epifitas, es decir, que viven sobre otro organismo, miden desde 20 cm a 1 metro cuando los tallos de ciertas familias alcanzan su máximo crecimiento, tienen la capacidad de habitar en árboles, piedras y suelo, sus tallos están cubiertos por filamentos que cubren las zonas responsables del crecimiento vegetal, su tejido vascular es escaso. Se dice que los musgos fueron los primeros en habitar el ambiente terrestre con una amplia distribución, requieren preferiblemente ambientes húmedos para llevar con éxito su ciclo de vida (Delgadillo, 2014). Su reproducción puede ser sexual o asexual, son muy resistentes y fuertes, son bastantes los géneros que se hallan en las orillas del océano ártico hasta la Antártida y trópicos, ya que como se mencionaba anteriormente les gusta las zonas húmedas. Sin embargo algunos resisten sitios con escasas de agua; algunas especies se adaptan en zonas con determinadas características, y es precisamente esto lo que los convierte en bioindicadores de diversos factores, como por ejemplo, algunos sólo habitan en suelos alcalinos, mientras que otros les gusta la acidez, otras clases de musgos únicamente progresan y vive en zonas donde hay Cobre, otros les gusta exclusivamente las cuevas rocosas, entre muchas otras condiciones (Fernandez & Valdés, 1981).

Los musgos se caracterizan por tener el gametofito que tiene la función de fijar el sustrato a través de los rizoides, una cápsula que tiene dientes pequeños y una seta elongada, los musgos poseen diversos colores como verdoso, rojo, negro y amarillo; dentro de todos los géneros el género que tiene la capacidad de retener hasta un 80% de

agua es *Sphagnum* ya que sus células están formadas por paredes reforzadas y son las que le permiten absorber toda el agua, los hábitats que contienen estas especies normalmente son ácidos y no permiten que el material vegetal se degrade y se convierte en reservas de carbono. Por otra parte, la especie de musgo *Bryum argenteum* es utilizada en la Antártida en el monitoreo del grosor que tiene la capa de ozono ya que varía su producción de flavonoides a raíz de la estimulación de la radiación ultra violeta B (Morales *et al.*, 2017). Las hojas generalmente se forman en forma de espiral sobre el tallo y pueden tener diversas formas según su especie (Motito & Rivera, 2017). Los musgos resultan ser los mejores bioindicadores para el monitoreo de metales pesados ya que su pared celular es tan frágil que permite el ingreso de iones metálicos. Además su diversidad de ventajas tales como su alta distribución geográfica en ambientes diferentes como bosques, desiertos, urbanización, orillas de ecosistemas acuáticos y lo mejor es que crecen en toda época del año, son capaces de adaptarse a las condiciones de su hábitat, a tal punto de algunas especies soportar altos niveles de contaminación, produciendo así una acumulación de metales pesados en musgos por deposiciones atmosféricas tanto secas como húmedas por su permanente interacción (Bertrand, 2016).

Ecología: Los musgos están presentes en todo el planeta, desde las regiones árticas, regiones templadas y trópicos donde forman familias con grandes vegetaciones que dominan estos ecosistemas en forma de alfombras o colchones, su presencia es muy importante en zonas montañosas altas, como lo comentaba anteriormente en todas partes hay presencia de musgos con excepción en el mar, muy pocas especies harán presencia en orillas de la playa, cabe resaltar que los musgos son plantas que utilizan muchos sustratos tales como áreas rocosas, tierra, corteza de los árboles, ríos, charcos, pantanos, praderas,

árboles en descomposición, paredes y todo sustrato disponible, aunque prefieren las altitudes entre 1900 y 3800 metros sobre el nivel del mar, puesto que en estas altitudes hay mayor humedad en los habitats. En cuanto a los musgos epífitos viven en las ramas de árboles, siendo estos grandes retenedores de agua y los factores más importantes que determinan la colonización de estos musgos en cierto habitat es la temperatura y humedad, estos organismos generan microhábitas para otros seres vivos como los artrópodos (Serrano, 1992). Los musgos tienen la capacidad de sobrevivir periodos de tiempo en habitats secos o con limitado contenido de agua, por lo que se les reconoce su tolerancia a la deshidratación, también es conocido que durante este proceso de resequead no hay proceso de fotosíntesis y la respiración llega a valores muy cercanos a cero, cuando vuelve las lluvias se rehidratan nuevamente y así mismo se restituye el proceso de respiración y de fotosíntesis (Montenegro, 2011).

Biología: Los musgos de por si son de tamaño pequeño y no tienen crecimiento secundario, aunque algunas especies si tienen tallos colgantes que pueden llegar a medir hasta 1 metro de longitud, no tienen floema ni xilema siendo estos tejidos internos de conducción, no tienen cutícula y son poiquilohídricos (Cubas, 2008). Los musgos tienen un cordón central de células que están rodeadas de abundantes capas de células parenquimatosas que a su vez también las rodean células epidérmicas con capas gruesas, los tallos tienen rizoides papilosos y otros lisos, estos rizoides son filamentos con múltiples células, además están cubiertos por filamentos ramificados que reciben el nombre de parafilios, en cuanto a sus hojas son láminas de una célula y en la parte media tienen células de conducción tanto en la base como en lo largo de su cuerpo y sostén, en cuanto a las células foliares estas tienen diversas formas y tamaños. Sus órganos sexuales son los

anteridios siendo este el organo sexual masculino donde se forma los gametos llamados anterozoides y arquegonios reproductor de gametos femeninos llamados oosfera, que a la vez son protegidos por hojas y parafisos que ayudan a mantener la humedad siendo este un factor importante en el proceso de la fecundación, este proceso reproductivo se lleva a cabo cuando los anteridios se abren y los anterozoides se desplazan al arquegonio donde se producirá la fecundación, luego el cigoto produce esporofitos produciendo a la vez esporas mediante el proceso de meiosis, finalmente estas esporas se las lleva el viento llegando a habitats nuevos donde se germinará un nuevo ser (Delgadillo, 2014).

Taxonomía: Los musgos pertenecen al reino plantae con división Bryophyta y a la vez tiene 8 clases tales como Bryopsida siendo este el que mayor número de especies tiene, Takakiopsida y Sphagnopsida son grupos basales, Polytrichopsida, Andreaeopsida, Andreaebryopsida, Tetraphidopsida, Oedipodiopsida (Ferriol & López, 2020). Los musgos contienen entre 12.800 a 13.000 especies en todo el mundo, la diversidad de especies que tienen los musgos les permite habitar y colonizar zonas que otras plantas no resistirían o no son habitables, en el caso de México han reconocido 984 especies, lo que representa un 8% del mundo, la familia más grande y diversa es la Pottiaceae con un total de 158 especies, el bajo número de especies en México tiene que ver con el bajo nivel de endemismo, además de que muchas especies se encuentran perturbadas y en riesgo por actividades del hombre (Delgadillo, 2014). Las 13.000 especies de *Bryophyta* o musgos se agrupan en 913 géneros y a su vez en 114 familias, esta agrupación de musgos ocupa el segundo lugar de plantas más diversas que han llegado a colonizar la mayoría de hábitats a excepción de los ecosistemas marinos y en el grupo de las briofitas si ocupa el primer lugar por su diversidad y morfología foliosa (Motito & Rivera, 2017).

La taxonomía de la flora de los musgos en Colombia según artículo realizado por Aguirre & Rangel (2008), Colombia tiene registrado 976 especies con 264 géneros con 72 familias, la mayor cantidad son encontradas geográficamente en áreas con mayor altitud y a medida que disminuye la altitud también disminuyen los musgos, por ejemplo el 73.5% de especies de musgos se encuentra en la cordillera oriental, el 59.6% se encuentran en la cordillera central y el 28.8% de riqueza están situados en la cordillera occidental, en cuanto a la riqueza de familias está en la región Andina. Existe sólo un género que se presenta de forma negativa por lo que es catalogado como endémico y es *Gradsteinia*, las familias más ricas en géneros y números de especies fueron Pottiaceae con 23 géneros y 72 especies, Dicranaceae con 20 géneros y 97 especies, Pilotrichaceae con 17 géneros y 93 especies, Hypnaceae con 17 géneros y 33 especies, Sematophyllaceae con 13 géneros y 46 especies, Brachytheciaceae con 12 géneros y 42 especies, Orthotrichaceae con 6 géneros y 58 especies, Neckeraceae con 8 géneros y 24 especies, Polytrichaceae con 8 géneros y 24 especies, Bartramiaceae con 7 géneros y 56 especies, Bryaceae con 5 géneros y 46 especies, Calymperaceae con un total de 4 géneros y 42 especies; en cuanto a los géneros más ricos en especies son *Campylopus* con 43 especies, *Sphagnum* con 38, *Fissidens* con 36, *Lepidopilum - Sematophyllumcon - Syrrhopodon* con 25, *Bryum* con 23, *Macromitrium* con 22, *Philonotis* con 21, *Breutelia* con 19, *Leptodontium* con 15, *Cyclodictyon* y *Schizymerium* con 14, *Dicranella* con 13 y *Orthotrichum* con 12 para un total de 976 especies.

Efecto bioindicador: Los musgos son ideales para evaluar los efectos de la contaminación atmosférica debido a sus características estructurales (tienen una cutícula muy delgada, otros no tienen dermis, estomas, ni tampoco un tejido conductivo interno),

además dependen de la atmósfera para nutrirse, esto los hace muy sensibles y a la vez vulnerables (Serrano, 1992). Por tal razón, resultan ser organismos con alto potencial para evaluar la contaminación atmosférica y ser utilizados en estudios tanto de laboratorio como de campo, teniendo en cuenta su función bioindicadora de alteraciones en la calidad del aire y perturbaciones ecológicas, a tal punto que los musgos que han estado presente en altos niveles de contaminación tienden a disminuir su cobertura en esa zona, además de perder su clorofila y vitalidad para reproducirse sexualmente, por ende como consecuencia termina extinguiéndose esta especie en la zona, por lo tanto, la ausencia y presencia de musgos permite conocer su sensibilidad o tolerancia a contaminantes y de esta manera determinar la calidad del aire (Bertrand, 2016). Los musgos también resultan ser altamente sensibles a ciertas condiciones climáticas debido a que no tienen la capacidad de regular o controlar el agua en sus tejidos y por lo tanto no previenen la desecación, a esto se les llama poiquilohídricos (Mejía & Castro, 2018).

El musgo es empleado como bioindicador inclusive en partes donde hay ausencia de musgo, lo pueden hacer por medio de biomonitoreo pasivo trasplantando musgos al sitio que se quiere estudiar, tanto el biomonitoreo activo en musgos nativos, como en trasplantes han sido usados con éxito para evaluar la calidad del aire en zonas urbanas, según ecólogos alrededor del mundo teniendo en cuenta sus estudios e investigaciones relatan que estas comunidades han venido desapareciendo sobre todo en zonas industriales y en ciudades como consecuencia de la contaminación del aire (Toledo *et al.*, 2014). Generalmente las concentraciones de mercurio en musgos indican los flujos de deposición de Hg atmosférico, este efecto bioindicador permite hallar puntos tanto naturales como con actividades antropogénicas que produzcan emisiones, de esta manera es como se evalúa los

cambios temporales teniendo en cuenta las deposiciones de Hg. Este tipo de monitoreo con musgos permite valorar los impactos en ecosistemas, ya que los musgos tienen una semejanza a los líquenes en cuanto a su extensa diversidad y distribución geográfica, además de estar presentes en todas las estaciones climáticas, la gran mayoría de especies son ectohídricos, es decir, que no tienen tejidos internos de conducción, carecen de cutícula y raíces por lo que dependen principalmente de las sustancias o partículas atmosféricas para su metabolismo. Por lo tanto, los musgos sirven para evaluar la calidad del aire por su sensibilidad a gases contaminantes (Cuadrado, 2011). Los musgos son acumuladores muy eficientes de metales pesados y otros compuestos tóxicos como dioxinas de aerosoles, hidrocarburos aromáticos policíclicos, radionúclidos, debido a sus grandes superficies y a su crecimiento lento (Mejía & Castro, 2018).

Clavel del aire

Los claveles de aire son plantas epífitas y herbáceas con hojas largas que terminan en punta, absorben no sólo agua y nutrientes sino también contaminantes atmosféricos, viven en rocas y arbustos, contienen un tallo con una gran cobertura de tricomas, estos tricomas cumplen la función de dar color y buen aspecto a las hojas, también atrapan agua que cae de la lluvia o el rocío de la noche y a la vez recogen y absorben partículas atmosféricas presentes en el aire por medio de sus hojas, su alimento lo obtienen a través de la fotosíntesis. Las especies *Tillandsia recurvata* y *Tillandsia aeranthos* son muy comunes en Argentina, las flores de estas especies son hermafroditas y en general los claveles de aire se reproducen sexualmente ya que sus flores contienen néctar que atraen a

polinizadores, luego las flores libera semillas que se dispersen por medio del aire terminando por nacer en árboles cultivados y autóctonos, su crecimiento es rápido; en el caso de las zonas urbanas también es muy común verlos en ramas de árboles, en techos de las casas, cables aéreos y en cualquier grieta de estructuras inertes, se rinde en cantidad por eso muchas veces son fumigadas con herbicidas para evitar su inmensa propagación (Mongiello & Otero, 2017). Su ciclo de vida les gusta pasarlo sobre arboles como prunus, Quescus, Gingkgo, Cupressus, Cedrus y Pinus, esta epífita prolifera bastante bien en climas cálidos, a pesar de esto toleran temperaturas inferiores a los 0°C, les gusta la humedad y el aire limpio, son bastantes sensibles a la resequedad, si este es el caso no sobreviven más de dos meses. Por esta razón sirven como bioindicadores de la contaminación atmosférica con un mínimo de humedad relativa, además son plantas economizadoras puesto que en la noche abren sus estomas y en el día las cierran para que el agua no se evapore, también en el transcurso de la noche retienen dióxido de carbono y en el día es liberado bajo energía del sol, a esto es lo que llamamos proceso de fotosíntesis (Cesio, 2018). Las bromelias son hospedadoras de insectos, crustáceos, moluscos, ácaros y pequeños anfibios, además de esto son captadoras de agua y acumuladoras de nutrientes provenientes del ecosistema, sin embargo, es una familia poco estudiada (Alvarado *et al.*, 2013).

Ecología: Los claveles de aire crecen sobre otra planta u objeto usándola como soporte más no son parásitas, casi siempre buscan árboles grandes, crecen de manera independiente y el apoyo que tienen con la otra planta u objeto es netamente apoyo físico, ya cuando la especie es muy abundante si puede llegar a afectar por el peso y sombra que le genera a la planta que le está prestando el soporte (Galván *et al.*, 2017). A través de sus

hojas absorben nutrientes y almacenan humedad, viven en diversos micro hábitats por su tolerancia a alteraciones ambientales, por consiguiente no le dan importancia a la condición climática (zonas secas, lluviosas, cálidas y frías) ni ambiental (Alvarado *et al.*, 2013). Están presentes en Centroamérica, Sudamérica, sur de Estados Unidos y México, pueden estar situados en cualquier superficie teniendo en cuenta que no necesitan ningún sustrato en especial, tales como jardines domésticos, cables aéreos, paredes abandonadas, estructuras inertes, en ramas de árboles de ciudades, bosques, montañas, encinares, matorrales, desiertos, etc., cabe resaltar que esta planta epífita le gusta más que todo troncos y tallos de otros árboles para poder crecer (Astegiano *et al.*, 2007).

Biología: tienen reproducción sexual y asexual, donde esta última se lleva a cabo mediante retoños o hijos que nacen junto al tallo de la planta madre, estos crecen juntos y de esta manera pueden llegar a colonizar todo un ecosistema, en cuanto a la reproducción sexual se produce por el néctar de las flores que atrae insectos polinizadores contribuyentes en este proceso, posteriormente pasada la flor se dispersan semillas que son arrastradas por el viento y alojadas en cortezas de otros árboles para germinar y nacer una nueva planta (Mongiello & Otero, 2017). Sus hojas tienen estructura epidérmica que reciben el nombre de tricomas peltados, constituido por múltiples células que absorben todos los nutrientes, agua y polvo proveniente del ambiente, inicialmente las células del escudo son las que absorben para luego ser conducidas mediante las células del pedicelo al mesófilo, este proceso también regulan la temperatura y protege contra plagas (Alonso *et al.*, 2005).

Taxonomía: Los claveles son plantas epífitas pertenecen al reino plantae, con división Magnoliophyta, clase Liliopsida, con orden Poales, familia Bromeliaceae esta

familia tienen cerca de 50 géneros, Colombia ocupa el segundo lugar en riqueza de quiches o cual representa un 37% (Alvarado *et al.*, 2013), subfamilia Tillandsioideae y Género Tillandsia, son un grupo de bromeliáceas muy diversas con más de 3000 especies, habitan en zonas boscosas, montañosas, selvas y desiertos. La *Tillandsia aeranthos* es una especie pequeña tienen de largo de 10 a 30 cm, tiene distribución en Brasil, Argentina, Paraguay y Uruguay; *Tillandsia usneoides* esta especie si crece bastante, puede formar grandes cortinas de 1 a 6 metros de largo, cuando alcanzan una edad avanzada no tienen raíces y sus flores son verdes, le gusta el clima cálido con presencia de humedad y aire limpio; *Tillandsia duratii* o azahar morado es una especie de clavel grande con forma de escultura, con hojas grandes y enroscadas (Granados *et al.*, 2003), cuando son adultas tienen la capacidad de soportar heladas y sequías no muy extensas, necesita buena calidad de aire y humedad, son encontradas en Argentina, Bolivia, Brasil y Paraguay. *Tillandsia australis* es una especie con un potente potencial para absorben grandes cantidades de agua procedente de la lluvia y rocío, por tal razón también son llamadas tanques porque recogen litros de agua y las acumulan para las épocas de sequías, puede crecer bajo la sombra sin ningún inconveniente (Cesio, 2018).

Efecto bioindicador: Son plantas bioindicadoras de la contaminación atmosférica por su eficiencia acumulando metales pesados, además son muy resistentes a situaciones de estrés ambiental y esto les permite habitar diversos hábitats (Zanabria & Moiso, 2009), los claveles de aire son utilizados en monitoreos de la contaminación ambiental ya que por su efecto bioindicador permiten evaluar la calidad del aire, también por ser bioacumuladores de partículas presentes en la atmósfera (compuestos orgánicos), su uso es frecuente y potencial en estudios facilitando muestrear tanto en espacio como en tiempo, también

permite el monitoreo de zonas amplias y lo mejor de todo es posible llevarse a cabo una evaluación de contaminación atmosférica a bajo precio, revelando la presencia de contaminantes tóxicos en el aire como metales y gases más que todo, una de las grandes ventajas de esta planta es que por más que hayan lluvias son se lavan las partículas anteriormente acumuladas (Mejía *et al.*, 2018).

Aves

Las aves han sido buena elección como bioindicadoras y monitoreo por tener abundancia a grandes escalas, además su influencia tiene mucho que ver con las características del lugar en que habitan, cada especie puede responder muy diferente de acuerdo con las alteraciones ambientales presentes, así mismo, la ausencia o presencia de las mismas indican alguna condición ambiental en particular (Villegas & Garitano, 2008). Birdlife Internacional es la entidad encargada de seleccionar zonas con mucha importancia para las aves en todo el mundo más conocidas como IBA (Important Bird and Biodiversity Areas), en promedio tienen un 80% de toda una biodiversidad a nivel mundial, lo que significa que los sitios importantes para las aves también lo son para todos los seres vivos, ya que estos seres cuidan muchos ordenes biológicos (SEObird, 2013). La oficina estadística de la Comunidad Europea utiliza aves del común como bioindicadores y de esta manera evaluar el bienestar y sostenibilidad ambiental, cabe resaltar que estas especies deben cumplir ciertas características como tener abundancia y presencia en la zona de estudio (Catalá, 2014).

Taxonomía: En el mundo existen 10.000 especies reconocidas y estudiadas, en todos los climas y hábitats están presentes, hay 29 órdenes de los cuales en Colombia hay 22, son bioindicadores de la salud del medio ambiente o de cualquier alteración presente en los ecosistemas; en Ecuador tienen registrado 1640 especies, Brasil 1767 especies, Venezuela 1383, España 300 aves y en Irlanda no alcanza las 150, en el caso de Colombia es un país muy diverso en aves a nivel mundial tiene registrado 1871 especies (Osorio & Molina, 2009). Pertenecen al grupo de los vertebrados con dominio eucaria, es decir sus células son eucariotas, pertenecen al reino de los animales su reproducción es sexual, su alimento y energía la adquieren a través de materia orgánica, con subreino Eumetazoa – eumetazoos por ser seres formados por tejidos por ser pluricelulares, su filo Chordata – cordados porque tienen cuerda dorsal, subfilo vertebrados formados por una columna vertebral, craneados y cordados, intrafilo gnatostomados por tener mandíbulas, superclase tetrápodos porque tienen cuatro extremidades (alas y patas), clase aves, orden Paseriformes, familia Motacillidae, género Motacilla (Almagro, 2014).

Ecología: Los continentes con mayor abundancia de especies son América, Oceanía y Asia, habitando la mayor parte de aves en climas cálidos como el trópico americano, trópico Asiático, Nueva Zelanda, Australia, es claro que en los climas fríos es menor la cantidad de especies a diferencia de las zonas cálidas, por otra parte, existen 1186 especies amenazadas de extinción, debido al avance urbano, malas prácticas agrícolas, ganadería extensiva, contaminación del aire por industrias y automotores, contaminación de agua por medio de vertimientos y alcantarillados. De estas 900 especies habitan en bosques haciendo nido en árboles, 400 anidan en pastizales y sabanas, las otras 300 especies viven en zonas artificiales tales como parques, lagos y jardines urbanos, ya para

terminar con 150 especies en extinción viven en humedales de agua dulce y salada (SEObirdlife, 2013).

Colombia es un resguardo para muchas aves por estar posicionada geográficamente en un lugar donde sí o sí deben pasar para otros continentes como es el caso del norte de Argentina, Paraguay y el norte de Canadá hacia el sur de Brasil, además de aquellas que migran buscando un resguardo del frío del invierno de Argentina, Brasil y Paraguay (Osorio & Molina, 2009).

Biología: Su cuerpo está cubierto de plumas, estas ayudan en la detección de algún problema de salud en las aves, sus patas tienen escamas muy parecidas a las de los reptiles requieren de bastante alimento ya que tienen mayor gasto de energía al mantener su temperatura corporal, dos de sus extremidades son alas con las que pueden volar aunque no todas las aves lo hacen, tienen perfectamente regulado su peso corporal para el vuelo, por otra parte, son ovíparas y su fecundación es interna. Su cuerpo se compone de cresta, frente, corona, auricular, lorum, maxila, nuca, garganta, mandíbula, pecho, cuello, manto, coberteras, flancos, abdomen, rabadilla, rectrices, infra caudales, álula primaria y secundaria (Villegas *et al.*, 2008). Algunas especies tienen a una sola pareja durante su periodo de reproducción (monógamas), mientras que otras especies los machos se aparean con varias hembras durante la misma temporada de reproducción llamadas poliginias, anidan en grande cuando en su hábitat hay abundancia por ejemplo en climas templados esto ocurre más que todo en la primavera, sus huevos pueden cambiar de color dependiendo del sitio donde están ubicados para ser camuflados del enemigo, las aves

tienen un corazón de 4 cámaras, poseen 2 pulmones con 7 a 12 sacos ya que durante su vuelo demandan bastante oxígeno (Roper, 2016).

Efecto bioindicador: las aves son comúnmente llamadas barómetros biológicos por su gran eficiencia bioindicando la calidad ambiental del sitio de supervivencia (rurales y urbanos), ya que su ausencia o presencia siempre están indicando algo, en el caso de ausencia o disminución de especies en áreas urbanas significa la presencia de alteración y deterioro ambiental. Por lo que no es un sitio saludable; cuando hay presencia indica una buena calidad del aire y ambiental, además para que existan aves se necesita la presencia de muchos árboles, especialmente aquellos nativos que ofrecen alimento para las aves (Osorio & Molina, 2009).

Microorganismos

Las bacterias son microorganismos que tienen reproducción binaria, tienen la capacidad de crear material genético y energía para su propio desarrollo y crecimiento (Perez & Mota, 2011). Antonie Van Leeuwenhoek fue el primero en observar microorganismos a través de un microscopio, estos seres son de los más numerosos y primitivos que viven en todo el planeta tierra y que habitan en agua, suelo y aire, además tienen una constante interacción con animales, plantas y el hombre, tienen participación ecológica y metabólica que contribuyen a problemas de salud y contaminación ambiental, son más abundantes que los macroinvertebrados y se adaptan muy fácilmente a diversos cambios ambientales, las bacterias pueden ser encontradas en temperaturas bajo cero como

en temperaturas, en ambientes secos y en ambientes húmedos (Montaño *et al.*, 2010). Las bacterias son procariontes porque no tienen núcleo celular, tienen una organización celular muy sencilla ya que los cloroplastos, mitocondrias y el ADN se encuentran libres en el citoplasma, tienen una longitud entre 0.5 y 5 μ y esto hace que no se puedan ver a simple vista, la tinción de Gram ha sido uno de los métodos más usados para evaluar morfológicamente a las bacterias, por otra parte, existe 4 categorías de bacterias Eubacterias Gramnegativas con pared celular, Eubacterias Grampositivas también con pared celular, eubacterias sin pared celular y están las arqueobacterias (Sánchez *et al.*, 2011), estos microorganismos que tienen reproducción binaria, tienen la capacidad de crear material genético y energía para su propio desarrollo y crecimiento (Pirez & Mota, 2011).

Los hongos son microorganismos eucariotas y pueden ser unicelulares o pluricelulares y dependiendo del ambiente en el que viven como seres en descomposición se llaman saprófitos, otros que se asocian a otros organismos son llamados simbioses, un claro ejemplo de estos son los líquenes, también están los hongos anemófilos que son hongos presentes en el aire de los cuales profundizaré en los artículos de estudios realizados a nivel Nacional e internacional (Sánchez *et al.*, 2018). Estos hongos anemófilos son microorganismos que están presentes en todos los ambientes, independiente del lugar, época o clima, por lo que finalmente se terminan inhalando y estos cuando se forman en grandes cantidades se convierten en partículas diminutas llamadas esporas que permanecen en el aire (Díaz *et al.*, 2010). la presencia de esporas en el aire está directamente relacionadas con la mala calidad del aire bioindicando así la presencia de contaminación atmosférica por actividades antropogénicas y condiciones meteorológicas. Por otra parte,

no existe una norma que regule la presencia de microorganismos, sin embargo, cuando existe una concentración superior a 1000 UFC/m³ es considerado un ambiente no aceptable y cuando alcanza valores de 10000 UFC/m³ es porque ya es un ambiente totalmente contaminado (Romero, 2009). Las esporas fúngicas son componentes normales de ambientes externos y pueden ser la fuente contaminante de los ambientes internos y muchos de estos pueden servir como sitios de amplificación para el crecimiento de los hongos (Vilchez, 2018).

Taxonomía: Se pronostica la existencia de 3 a 10 millones de especies de bacterias y 2 millones de especies de hongos, en el suelo existen miles de poblaciones y en todos los ecosistemas del planeta tierra deben existir grandes cantidades de microorganismos no descubiertos (Montaño *et al.*, 2010).

Los hongos pertenecen al reino fungi, con filos ascomycota, basidiomycota, zygomycota, glomerulomycota, chytridiomycota, su clase es mycetes, su orden es ales y de hay se desprende los diversos géneros y especies de hongos que existe en el planeta tierra, tanto microscópicos como los que se pueden observar a simple vista (Muñoz *et al.*, 2007).

Las bacterias pertenecen al reino *proteobacteria*, clase γ -*Proteobacteria*, ordenes *Enterobacteriales*, *Chromatiales*, *Thiotrichales*, *Legionellales*, *Pseudomonadales*, *Vibrionales*, *Pasteurellales*; familia *Enterobacteriaceae*; géneros *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella*, *Proteus*, *Salmonella*, *Serratia*, *Yersinia*, *Serratia* y *Shigella*; que a su vez este género tiene las especies *S. dysenteriae*, *S. boydii*, *S. flexneri*, *S. sonnei* (Pirez & Mota, 2011).

Ecología: El suelo y agua juegan un papel muy importante para los microorganismos presentes en el aire, puesto que estos dos factores son la fuente de reproducción ya que el viento es el creador de polvo del suelo y a su vez estas partículas de polvo son las que transportan microorganismos del suelo al aire, por otra parte, las gotas de agua originadas en cuerpos de agua naturales también pueden contener microorganismos que se van a la atmósfera, las esporas de hongos son los organismos que mayor tienen presencia en el aire (Marín, 2018).

Las bacterias son los organismos más abundantes en todo el planeta tierra, están presentes en todas partes al mismo tiempo (ubicuas), tienen la capacidad de vivir en condiciones muy extremas de presión y temperatura, pueden ser combinadas con otras sustancias químicas y contaminantes presentes en el aire, algunas presentan resistencia a contaminantes y viven en conjunto en el ambiente sin ningún inconveniente (Guerrero *et al.*, 2005). Estos microorganismos necesitan de ciertas condiciones ambientales para crecer y proliferar adecuadamente tales como la humedad que es indispensable para la vida de las bacterias, la temperatura ideal sobrepasa los 37 °C, una acidez de pH cercano al neutral y nutrientes para ser alimentadas, de preferencia con muy bajo contenido en azúcares y si bastantes proteínas (Silvia & Vinuesa, 2008). También necesitan de una fuente de carbono para lograr sobrevivir sea cual sea su hábitat (Bettie & Graham, 2011), su hábitat puede estar en el suelo, aire, desechos radioactivos, charcas o manantiales, en la corteza terrestre y a su vez en las profundidades marinas, por otra parte, se estima que en un 1 gramo de tierra hay 40 millones de células de bacterias y 1 millón de células bacterianas en tan sólo 1 mililitro de agua dulce (Leal, 2016). Las bacterias se clasifican en aerobias, porque crecen en presencia de oxígeno y este es indispensable para desarrollarse y sobrevivir; anaerobias

porque no necesitan oxígeno para crecer y vivir y facultativas porque crecen en presencia y no presencia de oxígeno (Pirez & Mota, 2011).

Los hongos son seres que no tienen la capacidad para aprovechar los minerales del suelo ni la energía de la luz solar, lo que sí aprovechan es la energía de material orgánico, su existencia prevalece en sitios con alta biomasa ecológica como lo son bosques con acumulación de hojarasca, excremento o zonas artificiales como en el aire interior y exterior de sitios urbanos, por otra parte, las condiciones meteorológicas y factores que influyen bastante para que los hongos se puedan desarrollar como es la humedad en el ambiente, humedad del suelo, luminosidad, vientos, contaminación del aire o atmosférica (Cuesta, 2005). Las esporas de hongos permanecen en ambientes externos pero cuando se encuentran en ambientes internos son fuente de contaminación y en ese momento se aumenta el crecimiento y proliferación de hongos (Limaco *et al.*, 2010). En las ciudades la alteración ambiental cada vez es más grande y sobre todo grave debido a actividades antropogénicas, de tal manera, el aire permanece contaminado con sustancias físicas, químicas y biológicas tales como los hongos, ya que las demás sustancias contaminantes facilitan la supervivencia y propagación de los mismos (Vilchez, 2018).

Biología: Las bacterias son microorganismos unicelulares procariotas por lo que no tienen orgánulos internos ni núcleo, su pared celular está compuesta por peptidoglucanos, su tamaño oscila entre 0.5 y 5 μm , tienen forma de barras, hélices o esferas, las bacterias son móviles y tienen flagelos para su desplazamiento, su reproducción es llevada a cabo por partición o esporulación, tienen ADN con doble cadena y circular, otras bacterias

tienen ADN extracromosómico llamado plasmídico, son portantes de información genética (Betancor *et al.*, 2006).

Los hongos tienen pared celular que cumple la función de proteger la célula de tipos de estrés ambiental, también permite la interacción con el medio ambiente, sus componentes tienen alta capacidad de inmunidad, la pared celular fúngica es muy diferente a las células vegetales. Cabe resaltar que los hongos son los únicos organismos que en su pared celular tienen quitina siendo este un carbohidrato que se encuentra también en el exoesqueleto de los artrópodos, también tiene glucanos que son polisacáridos presentes también en la pared celular de las plantas, razón por la cual algunos hongos producen metabolitos secundarios muy parecidos a los de las plantas (Pontón, 2008). Contienen vacuolas, tienen ADN con regiones tanto codificables como no codificables, membranas con esteroides, organelos citoplasmáticos, mitocondria, ribosomas, esteroides, además almacenan azúcares, polisacáridos y disacáridos, son heterótrofos y no poseen cloroplastos, su reproducción es sexual y asexual, dado que algunos se reproducen por fisión binaria o esporulación, su crecimiento es en forma de células filamentosas y elongadas, (Marín, 2018).

Efecto bioindicador: La presencia o aumento de la cantidad de hongos y bacterias indica cambios en el ambiente, lo que resalta la necesidad de establecer estos organismos para evaluar situaciones microbianas para monitorear la calidad del aire (Ríos *et al.*, 2017). Identificar y monitorear microorganismos dentro del material particulado sirve como bioindicadores de la calidad del aire, porque contribuyen en el diagnóstico para conocer y

tratar diversas patologías, además de poner en alerta la contaminación atmosférica presente en zonas urbanas (Romero, 2009).

Según la Red Española de Aero biología (REA) en su Manual de calidad y gestión de la Red Española de Aerobiología en 1997 dice que se considera la calidad biológica del aire en un determinado sitio de estudio bueno, aceptable, regular y malo dependiendo de la cantidad de concentración de esporas de hongos y bacterias (Galán *et al.*, 2007). Por ejemplo, el hongo *Akanthomyces sabanense* es un potencial bioindicador de la calidad del aire en la ciudad de Bogotá (Serrato *et al.*, 2019).

Contaminantes atmosféricos que interactúan con bioindicadores

Los bioindicadores interactúan con sustancias contaminantes en el ambiente y viceversa, puesto que los bioindicadores se encuentran expuestos al aire libre, por ende tienen la capacidad de medir los efectos provocados a raíz del nivel de contaminación presente en cada zona de hábitat, teniendo en cuenta que los contaminantes recaen sobre los tejidos del organismo bioindicador, este empieza a reaccionar debido a su sensibilidad, otros también reaccionan y a la vez bioacumulan sustancias, por último están los seres que presentan tolerancia a la contaminación por lo cual interactuar muy bien con los contaminantes adaptándose fácilmente a su presencia y así continuar su proceso metabólico anormal (Aránguez *et al.*, 1999).

Red de monitoreo y biomonitoreo

Una red de monitoreo de calidad del aire cuenta con un conjunto de estaciones que cumplen la función de monitorear la calidad del aire en una región o zona de estudio, por medio de uno o varios instrumentos que toman muestras y miden de forma constante los niveles de concentración de contaminantes presentes en el medio ambiente midiendo así la calidad del aire en la región (Instituto Nacional de Ecología, 2014), los datos pueden ser transmitidos a través de un celular o vía telefónica; las ventajas que ofrece la red de monitoreo son evaluar si los estándares de calidad del aire están siendo cumplidos o no en determinada zona y así conocer los niveles de contaminación, dar información de las tendencias de los contaminantes, proporcionar información fundamental para diseñar estrategias de mejoramiento de la calidad del aire y así mismo, provee datos para evaluar si resultan efectivas las estrategias y medidas implementadas para el mejoramiento de la contaminación (Secretaría Distrital de Ambiente, 2011). Para diseñar una red de monitoreo se debe tener en cuenta parámetros meteorológicos, geográficos, económicos, arquitectónicos y culturales de la localidad o región en que se quiere evaluar la calidad del aire, además es indispensable contar con una fuente estable de energía y protegida de posibles daños climáticos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Territorial, 2010).

Otra de las ventajas es que ofrece valores en tiempo real y con alta resolución, además da a conocer concentraciones mínimas vs máximas, estableciendo alertas en situaciones de niveles máximos de contaminación y de esta manera implementar medidas de contingencia; entre sus desventajas o limitaciones está el elevado costo que conlleva la

adquisición y operación de toda una red de monitoreo, por otra parte, es necesario la presencia de personas con conocimiento en su manejo ya que deben estar calibrando los equipos y así mismo, haciéndoles mantenimiento (Instituto Nacional de Ecología - INE, 2014).

Actualmente en Bogotá existe red de monitoreo con un total de 14 estaciones ubicadas en Guaymaral, Suba, Usaquén, Las ferias, Fontibón, Centro de alto rendimiento, Móvil cra 7, Ministerio de Ambiente, Carvajal, Kennedy, Puente Aranda, San Cristóbal, Tunal, y US consulate, donde la Secretaría de Ambiente desarrolló una aplicación que utiliza el sistema IBOCA para que cualquier ciudadano pueda acceder y conocer la concentración de los 6 principales contaminantes que afectan la ciudad ($PM_{2.5}$, PM_{10} , O_3 , NO_2 , SO_2 y CO) y que son producidos por fuentes fijas como industrias, fábricas, etc., junto a las fuentes móviles, especialmente vehículos que utilizan como combustible diésel, esta aplicación también da a conocer parámetros climáticos como la temperatura, presión atmosférica, humedad, viento, lluvias (Mapa de la calidad del aire en tiempo real, 2020). Según reporte de marzo del año 2020 los incendios registrados en los llanos orientales, el caribe, Magdalena medio, la Orinoquía y Venezuela en los últimos días son factores externos que han ayudado a incrementar el deterioro de la calidad del aire, esto debido a que el viento arrastra partículas que se concentran en la atmósfera de Bogotá. Estas emisiones por quemas de biomasa en realidad no han sido estudiadas a profundidad y ocurre más frecuente de lo que nos imaginamos, en la región amazónica de América del Sur este ha sido una de las mayores problemáticas desde ya hace muchos años, impactando así la calidad del aire. A nivel regional tuvieron en cuenta concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} donde pudieron demostrar que los incendios en la región dan respuesta al 11% de las

variaciones de CO anuales en la ciudad de Bogotá (Méndez *et al.*, 2019). Además, las variaciones de la calidad del aire a raíz del cierre en Sudamérica a raíz del COVID – 19 lo que fue el NO₂ tuvo una reducción del 60%, el PM₁₀ un 44% y el PM_{2,5} el 40%, datos de la época de cierre estricto a corto plazo, siendo estos excelentes resultados de disminución de contaminación atmosférica en Sudamérica, lo cual fue muy benéfico para la calidad del aire ya que normalmente América del Sur es la que más contribuye con emisiones globales con un 16% (Rincón *et al.*, 2020). Cabe resaltar que mientras en unos sitios disminuyó la contaminación en otras partes aumentó como fue el caso del norte de Sudamérica debido al alto porcentaje de incendios que se presentó durante esta época (Méndez *et al.*, 2020).

la Red de Monitoreo de Calidad del Aire dio informe de 12 estaciones que marcaron color amarillo, es decir un nivel regular para la concentración de partículas contaminantes y en las estaciones Santa fe, Carvajal – Sevillana y Móvil de la carrera séptima mostró color naranja lo que alerta que la condición del aire es mala (Castiblanco, 2020).

Por ende, la red de monitoreo de la calidad del aire tradicional es una herramienta muy favorable, siendo lo ideal tener muchas más estaciones de monitoreo en ciudades con alto grado de contaminación, pero teniendo en cuenta los altos costos que demanda no es posible; aquí vienen a jugar un papel muy importante los bioindicadores de la calidad del aire, ya que pueden trabajar juntos, es decir se puede implementar estas dos herramientas para aumentar las estaciones de monitoreo de la calidad de aire en aquellas zonas donde la red de monitoreo tradicional no ha llegado, con estaciones de biomonitoreo, haciendo juntas un gran trabajo en pro de la calidad del aire.

Contaminantes atmosféricos

Contaminantes primarios:

Los contaminantes primarios son aquellas sustancias emitidas directamente de una fuente hacia la atmósfera, un claro ejemplo de esto son las industrias (Aránguez *et al.*, 1999).

Material particulado (PM₁₀ – PM_{2.5}): El material particulado consta de un conjunto de partículas orgánicas e inorgánicas tanto sólidas como líquidas que se encuentran suspendidas en el aire, y es precisamente estas partículas las que contribuyen en la contaminación atmosférica, dado que también pueden contener otras sustancias como cenizas de metales pesados, nitratos, sulfatos, amoníaco, entre otras. Producto de actividad antropogénica y natural, su presencia en la atmósfera genera disminución visual en la misma debido a que absorbe y a la vez dispersa la luz, además produce impactos severos en la salud humana, vegetación y materiales (Arciniégas, 2012). Se denomina PM₁₀ a las partículas de mayor tamaño (10 µm) y el PM_{2.5} pertenece a las partículas más finas con un diámetro de 2.5 µm (Instituto para la Salud Geoambiental, 2014), este material particulado pertenece a uno de los contaminantes criterio del aire y puede contener sustancias químicas orgánicas como metales, polvo y hollín (OEEHA, 2020). Las industrias metalúrgicas generan PM_{2.5} en un 59%, los caminos abiertos un 8% y la producción de energía eléctrica 6%, esto sin tener en cuenta otras fuentes como la industria automotriz, ladrilleras, etc (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017).

Partículas suspendidas totales (PST): estas partículas tienen diversos tamaños y formas, así mismo varía su composición entre compuestos sólidos y líquidos, también pueden contener compuestos orgánicos, metales gases reactivos, material biológico, iones

y carbón elemental, asbesto, berilio, humo, polvo; estas partículas pueden ser originadas por fuentes antropogénicas como automóviles, carros de carga, barcos, hornos industriales, etc., y fuentes naturales como incendios forestales, erupción de volcanes, suelos erosionados, etc (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017).

Monóxido de carbono (CO): Es un gas insípido, inodoro e incoloro generado a partir de una mal combustión o una combustión incompleta de fuentes móviles que usan gasolina como combustible, en la naturaleza es posible formarse cuando el metano CH_4 se oxida, el metano a su vez es formado por la descomposición de materia orgánica, su principal fuente antropogénica es la quema de combustibles internos y en especial los motores a gasolina; el monóxido de carbono es mortal a exposiciones a corto plazo en áreas cerradas (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017). Este contaminante es considerado uno de los grandes contaminantes presentes en la atmósfera de terrestre, siendo el 80% de emisiones de vehículos con combustible de diesel y gasolina, además de los procesos industriales con compuestos de carbono, incendios tanto forestales como urbanos y la quema de materia orgánica, esto lo convierte en uno de los mayores problemas ambientales en todo el mundo, especialmente en Latino América. En Colombia según el Instituto de Hidrología y Estudios Ambientales en el año 1996 estimó 8612 kilotoneladas de emisión de gases atmosféricos con efecto, donde el 58% pertenecía a CO (Téllez *et al.*, 2006).

Óxidos de nitrógeno (NO_x): Pertenecen a varios compuestos de gases incoloros químicos que se formaron al combinar N y O formando así Bióxido de Nitrógeno (NO₂) y a óxido Nítrico (NO), producto de combustión a altas temperaturas y aire comburente, una

vez liberados a la atmósfera reaccionan con otros contaminantes secundarios tales como el nitrato de peroxiacetilo (PAN) que al reaccionar foto químicamente se produce el smog o niebla (Madías, 2013); su excesiva presencia en el aire da un color pardo debido a que absorbe la luz en la parte azul – verde del espectro. Por otra parte, sobre las zonas urbanas las partículas suspendidas y el NO_2 se observan como una capa café roja, estos óxidos los emiten las industrias en un 64% y el otro 24% lo emiten las fuentes móviles (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017). En los últimos 100 años ha venido aumentando significativamente su concentración en la atmósfera producido por fuentes antropogénicas como los procesos industriales y fuentes naturales los océanos, procesos que tienen que ver con luz solar, quema de biomasa, suelo etc., (Galán & Fernández, 2006).

Hidrocarburos - Compuestos Orgánicos Volátiles (COV): Los COV son un grupo de compuestos en estado gaseoso que se encuentran en la atmósfera de forma muy variada, entre los que incluye una amplia gama de hidrocarburos como los aromáticos, alquenos, alcanos, cetonas, ésteres, alcoholes y tal cual compuesto clorado (Díaz & Linares, 2010). La principal fuente de emisión de estos contaminantes son las fuentes móviles, en segundo lugar, está el sector industrial, en especial la industria automotriz por el uso de artes gráficas y solventes (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017). Reciben el nombre volátiles porque a temperatura ambiente normal son muy volátiles teniendo diversos efectos directos e indirectos sobre la salud del hombre y sobre la salud medio ambiental, puesto que en la atmósfera y tropósfera participa en diversas reacciones químicas, formando así el smog fotoquímico, por otra parte, también contribuye en el desequilibrio del efecto invernadero y aumento del ozono troposférico (Red Ambiental de

Asturias, 2019). Algunos COV son gases efecto invernadero activos y aceleran al cambio climático, según estudios evidencian que los COV cuando reaccionan con radicales \bullet OH aumentan la concentración global de metano (CH_4) en la atmósfera, así mismo le prolongan el tiempo de vida en un 15% y al ozono en un 18% (Navazo *et al.*, 2003).

Dióxido de azufre (SO_2): Este contaminante es un gas irritante, con fuerte olor, no tiene color, su densidad es el doble que la del aire, es un gas no inflamable ni explosivo, además presenta solubilidad en agua, al punto de convertirse en ácido sulfúrico al unirse o entrar en contacto, en la atmósfera procede a oxidarse por lo que produce la formación de sulfatos que a la vez forman parte de las partículas del material particulado PM_{10} . La combustión de productos petrolíferos y la calcinación de carbón en sitios de calefacciones y centrales carboeléctricas son las fuentes principales emisoras de este gas a la atmósfera (Instituto para la Salud Geoambiental, 2013). Además de otras fuentes que usan combustibles poco refinados como maquinaria pesada, barcos gigantes, así mismo, fábricas de cemento, refinerías de petróleo, extracción de metales a partir de minerales como el Pb , Zn , Cu , Al y en general todo tipo de combustibles que contengan cierta cantidad de azufre, también algunas fuentes naturales lo producen tales como actividad geotérmica y volcanes (Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Querétaro, 2017). Este contaminante sobre la humanidad trae daños para la salud y para los ecosistemas, vegetación y diversidad daños severos en la vegetación, como la degradación de clorofila, por ende, provoca disminución en la fotosíntesis de las plantas lo que provoca finalmente la escases o pérdida de especies, también contribuye en el aumento del sulfato amónico (NH_4), que contribuye en el aumento de los niveles de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} (González & Sánchez, 2003).

Dióxido de carbono (CO₂): es un gas inodoro e incoloro que se compone de 1 átomo de carbono y 2 de oxígeno, en realidad este gas es un compuesto inorgánico necesario para la vida en la tierra dado que este gas lo exhalan en la respiración los seres vivos, además en las plantas es necesario en el proceso de la fotosíntesis que a la vez genera nutrientes y clorofila para su supervivencia, el problema de contaminación provienen cuando existe concentraciones muy altas (Instituto para la Salud Geoambiental, 2013), producto de procesos de combustión como es el caso cuando reacciona la oxidación de un hidrocarburo (Medina, 2010). A partir de la revolución industrial se ha venido incrementando notablemente la concentración de CO₂ en la atmósfera debido a la combustión de los derivados del petróleo junto a la deforestación, el uso de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo) una vez combustiona es devuelto a la atmósfera como CO₂, entre los principales sectores que utilizan estos combustibles y por ende generadores de este contaminante está el transporte que genera a nivel mundial millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, por ejemplo 1 kilómetro (km) en ferrocarril emite 35 gramos (gr) de CO₂, 1 km en autobús genera 30 gr de CO₂, 1 km en avión emite 180 gr y 1 km en carro convencional produce 150 gr de CO₂. También se encuentra el sector industrial que genera grandes cantidades de este contaminante debido al empleo de combustibles fósiles en el equipo de maquinaria que requieren los diversos procesos de producción para generar calor y vapor, dentro de las categorías de este sector industrial que más emiten CO₂ son las industrias de alimentos, de papel, las refinerías de petróleo, industrial de metales, de químicos y de aquellas cuyos productos son a base de mineral (Benito, 2016).

Dióxido de azufre (SO₂): Es un gas sin color presente en la atmósfera con un fuerte olor generado por la combustión de combustibles como el petróleo y carbón, siendo esta la principal fuente antropogénica que lo genera, así mismo, en procesos industriales de fundición de minerales con azufre y en el sector generador de energía eléctrica (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017). En los procesos de combustión es donde se combinan con oxígeno dando lugar así al dióxido de azufre, las fuentes móviles en especial los vehículos con combustible diésel y fijas dan lugar a estos procesos de combustión, las centrales térmicas productoras de electricidad a base de combustibles fósiles, el transporte marítimo es otro emisor de SO₂, en los procesos industriales durante el refinado de petróleo y así mismo la obtención y tratamiento de metales de Zn, Pb, Cu y Ni liberan cantidades significativas de este contaminante. Entre las fuentes naturales se encuentra las erupciones volcánicas siendo estas la principal fuente que libera SO₂, en los procesos biológicos como suelos y océano por la oxidación de azufre en la descomposición de plantas que finalmente se oxidan en la atmósfera produciendo SO₂, su vida está entre dos y cuatro días, por otra parte, este contaminante es uno de los procesos de acidificación (Instituto Valenciano de la Edificación, 2019).

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs): Son un conjunto con más de 100 sustancias químicas puras en forma de sólidos a veces incoloros, otras veces pueden ser amarillo leve y blanco, se forman a partir de la combustión incompleta de materia orgánica tales como basura, petróleo, gasolina y carbón, junto a otras sustancias orgánicas (Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición, 2020). Son de los contaminantes más extendidos en el medio ambiente y alimentos como los vegetales, aceites, granos y grasas, también se contamina con estos hidrocarburos los alimentos que son asados o rostizados

por el humo del carbón (Mastandrea *et al.*, 2005). Su presencia se debe a fuentes naturales como los incendios forestales y antropogénicas como la combustión de fuentes móviles y fuentes estacionarias. Los PAHs son un grupo de hidrocarburos constituidos por moléculas entre 2 o más anillos aromáticos de 5 o 6 carbonos que se fusionan a la vez por 2 o más átomos de carbono (García, 2005). Son los componentes mayores de material particulado del aire y de los aerosoles, se encuentran en abundancia en alimentos como granos, aceites, vegetales y grasas, la carne se contamina con estos hidrocarburos cuando se asa al carbón, se rostiza o se ahúma puesto que aumenta la acetilación de histonas o actúan en las enzimas acetiladoras o desacetiladoras (Ortiz & Cram, 2012).

Metales pesados: Son contaminantes primarios emitidos a la atmósfera mediante actividades antropogénicas principalmente por procesos industriales debido al desarrollo tecnológico junto al consumo masivo e indiscriminado es lo que ha aumentado la producción de metales en cantidades significativas en el ambiente especialmente en zonas urbanas (Acosta, 2007). Estos contaminantes son muy persistentes dado que se bioacumulan y cada vez su concentración es más fuerte, por otra parte, son contaminantes que persisten en el medio ambiente dado que no se degradan ni químicamente ni biológicamente, es precisamente esta dificultad para eliminarse lo que genera acumulación en tejidos biológicos de seres como vegetales y animales en todo el transcurso de la cadena trófica (acumulación y biomagnificación) (Reyes *et al.*, 2016). En la atmósfera es posible encontrarlos combinados o elementales y en estado de vapor o particulados, estos metales en el ambiente genera daños en la salud humana y desequilibrio en los ecosistemas, cabe resaltar que algunos metales como Zn, Cu, Co y Mo son necesarios e indispensables para

los sistemas enzimáticos ya que hacen parte de la hemoglobina y su ausencia provoca enfermedades y el exceso de contaminaciones (Márquez *et al.*, 2008).

Plomo (Pb): El plomo es un metal pesado generado por la combustión de combustibles con plomo, pinturas con plomo, tuberías, etc (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017). Es un metal tóxico que genera alto grado de contaminación atmosférica y ambiental, sin contar los problemas de salud en los ecosistemas y humanidad, teniendo en cuenta que es una sustancia que se acumula en diversos seres vivos (Organización Panamericana de la Salud – OPS, 2018). Entre las diversas fuentes de contaminación por Pb están las industrias, aunque en la naturaleza se encuentra en pequeñas cantidades y muy disperso, por ende el verdadero inconveniente está en que el hombre usa el Pb en sitios donde no se debería utilizar, produciendo contaminación por el plomo directamente y sus compuestos que quedan en suspensión transportándose en el aire, por lo que así termina contaminando no sólo la atmósfera, sino el suelo y agua. Las emisiones de Pb más significativas e importantes se producen en la minería, industrias metalúrgicas y en la transformación de este metal para uso industrial, así como también las baterías de coche, contrapesos de la pesca y perdigones utilizados en la caza (Vallés *et al.*, 2018).

Contaminantes secundarios:

Estos contaminantes son los que se forman a partir de procesos naturales químicos y fotoquímicos en la atmósfera (Ballester, 2005).

Ozono (O₃): Es un gas incoloro con bastante irritación, es vital en la protección de la tierra de las fuertes radiaciones UV, ya cuando el ozono se nos acerca mucho llegando a la tropósfera es dónde se convierte en un contaminante secundario perjudicial para el medio ambiente y la salud del hombre (IDEAM, 2014). Se forma directamente en la atmósfera como resultado de la reacción entre los COV_s y NO_x producto de la quema de combustibles, centros eléctricos, solventes químicos, vapores de gasolina etc., más la presencia de los rayos solares; cabe resaltar que este contaminante ante periodos cortos de exposición puede traer problemas respiratorios y pulmonares (Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC, 2017).

Dióxido de nitrógeno (NO₂): Es un gas que se forma cuando se mezcla NO con oxígeno en el aire, es de color marrón amarillento formado por 1 átomo de nitrógeno y 2 de oxígeno, este gas es muy irritante y tóxico, su origen antropogénico proviene de la combustión a altas temperaturas como la de vehículos automotores, especialmente los que utilizan combustible diesel que emiten NO, una vez estando en la atmósfera se oxida y se convierte en NO₂. Termoeléctricas, refinerías de petróleo contribuyen con el material particulado de partículas finas PM_{2.5} siendo estas partículas las más perjudiciales, por otra parte, el NO cuando reacciona con la luz UV aumenta el ozono troposférico (Instituto para la Salud Geoambiental, 2013). El aire contaminado con NO₂ inclusive con mínimas concentraciones puede llegar a ser nocivo para la salud de las personas, para la vegetación detienen y opacan su crecimiento, en metales acelera la corrosión de los mismos (Cuesta & Cabrera, 1992). En el medio ambiente detiene el crecimiento debido a que el NO₂ causa eutrofización y acidificación de ecosistemas afectando así metabólicamente a especies vegetales (Ministerios para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020).

Clorofluorocarbonos (CFC): Son sustancias químicas derivado de hidrocarburos saturados donde los átomos de H son remplazados algunas veces en su totalidad o en parte por átomos de C, F y Cl, no son inflamables ni tóxicos, además pertenecen al grupo de los halocarbonados, generalmente son utilizados por contener propiedades químicas y físicas adecuadas para emplearlos en pinturas, insecticidas, acondicionadores de cabello, productos plásticos expandidos, productos de propelentes, producción de frío, entre otros productos médicos, cuando llegan a la atmósfera son divididos y liberan átomos de cloro que son los que se encargan de afectar la capa de ozono (Acosta, 2007). Por ende lo convierte en el principal causante del adelgazamiento de la capa de ozono, pueden tener una supervivencia en la atmósfera entre 50 - 100 años y con el pasar de los años llegan a la estratósfera, allí son disociados debido a la radiación UV donde el Cl empieza a ser liberado destruyendo así el ozono presente en esta capa (Ministerio de la Transición Ecológica y el Reto demográfico, 2020).

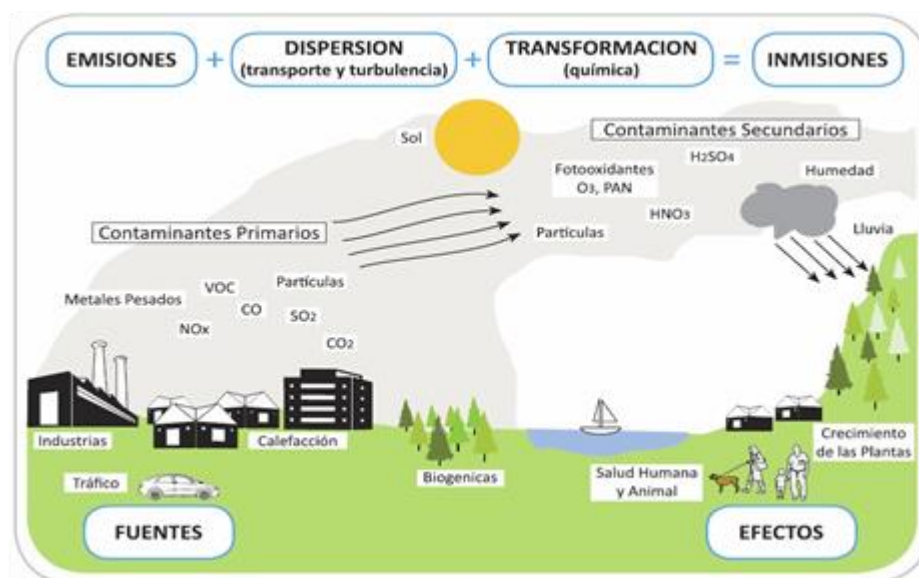


Imagen 3. Contaminación Atmosférica.

Fuente: Ministerio de Ambiente. (2020).

Evidencias de biomonitoreo de contaminación atmosférica

Estudios con líquenes



Figura 4. Líquenes. Elaboración propia.

❖ Estudios Nacionales

La emisión a la atmósfera de sustancias tóxicas es un problema ambiental que cada día viene en aumento y afecta a muchos países en desarrollo debido a la construcción urbana y así mismo la actividad de diversas industrias, en la ciudad de Tunja – Boyacá en los últimos tiempos se evidencia la disminución de zonas verdes por el aumento de urbanización, a causa de esto, es notorio el aumento de contaminación que deteriora la fauna, flora y hábitats de Tunja, además de contribuir con enfermedades respiratorias y

deterioro de la salud pública de la ciudadanía, por tal razón, esta ciudad realizó un estudio utilizando líquenes y otras plantas como bioindicadores ya que detectan cambios ambientales de manera rápida y temprana, para muestrear tomaron en cuenta 25 puntos entre áreas verdes más significativas de la zona urbana y rural, se tuvo en cuenta el método de Índice de Pureza Atmosférica IPA en zonas más influenciadas y afectadas; recolectaron 47 muestras de plantas no vasculares, de las cuales 7 fueron musgos, 10 plantas hepáticas y 30 líquenes, se reconoció la especie de liquen *Parmotrema austrosinense* como la más frecuente presente en 18 puntos seguidas las especies *Punctelia* sp y *Heterodermia albicans*; las estaciones de los parques Semáforos y Santander tuvieron un IPA de 8,5333 con dos especies influenciadas *Lobariaceae* sp y *Heterodermia albicans*, la estación de la Normal Femenina tiene un IPA DE 52,2196 por lo que resulta estar muy afectada por contaminantes atmosféricos, en la reserva forestal El Malmo tuvo 23 especies y un IPA de 34.0281, estos valores de IPA se agruparon en sitios de isocontaminación para representarlos cartográficamente. El tráfico vehicular es una de las fuentes que causan contaminación del aire junto con la infraestructura de nuevas vías de acceso, la urbanización son actividades que contribuyen a la tala indiscriminada de árboles nativos, se concluyó que el uso de estos bioindicadores tienen gran potencial para evaluar la calidad del aire de la ciudad de Tunja, además de que es una técnica muy natural y económica (Simijaca *et al.*, 2014).

En Medellín la Red SIATA es la delegada para evaluar la calidad del aire en esta ciudad y todos los municipios que le pertenecen al Valle de Aburrá con la utilización de equipos que generan altos costos, lo que genera limitación de los monitoreos, por lo cual existe la necesidad de encontrar nuevas alternativas que sean eficientes y sobre todo

económicas para poder monitorear mucho más lugares para así evaluar la calidad del aire en todo el Valle de Aburrá - Colombia, es por tal razón que propusieron los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire por su gran sensibilidad a la condición ambiental en que se encuentran, ya que su presencia o ausencia determina la presencia de contaminantes, además de provocar cambios en su desarrollo, vitalidad y abundancia, así que para llevar a cabo este estudio seleccionaron dos puntos de muestreo, uno con alto grado de contaminación que fue el edificio Miguel de Aguinaga cerca de una vía con alto tráfico vehicular y otro con baja contaminación que fue la Universidad de Medellín cerca de una zona residencial. Para la selección de árboles se tuvo en cuenta la metodología de Monge Nájera (2002) por su abundancia y sobre todo que no tuvieran ninguna muestra de actividad humana ni daños por animales, es decir muy sanos, seleccionaron 4 especies arbóreas *Eriquina fusca* Loureiro (búcaros), *Fraxinus chinensis* Roxb. (Urapanes), *Terminalia catappa* Linneaus (almendros) y *Mangifera indica* Linneaus (mangos) con tronco superior a los 20 cm; en los muestreos realizados se identificaron 8 especies liquénicas donde 2 pertenecen a especies crustáceas *Candelariella solediosa* Poel & Reddi y *Pixine Petricola* Nyl formadas por un talo que se incrusta fuertemente al sustrato, 5 son especies foliosas *Canoparmelia* s., *Heterodermia speciosa*, *Normandina pulchella*, *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr.) Hale. y *Spl*, estas tienen talos desprendidos del sustrato, y 1 especie fruticoloso *Cladonia* sp caracterizada por su talo con forma de cabellera con hebras ramificadas; en el punto de monitoreo de la universidad de Medellín se encontró el 95% de especies foliosas (5), lo que indica que existe buena calidad del aire, mientras que en el punto del edificio Miguel Aguinaga sólo se encontró 1 especie foliosa, en la estación de la U. de Medellín se encontraron talos primarios de fruticoloso *Cladonia*

sp., asociados a la especie *N. pulchella* (Borr.) Nyl; estos líquenes son asociados a la buena calidad del aire pero estos junto a los filamentosos serían los primeros en desaparecer en caso de contaminación atmosférica por su alta sensibilidad, sin embargo, su baja presencia (5,2%) puede estar indicando algún tipo de variación de la calidad del aire que impide su abundancia en esta zona. Por otra parte, en cuanto a los líquenes de los dos puntos de monitoreo se notó varias alteraciones como la reducción fotosintética causando decoloración en el talo esto ocurre cuando existe contaminación en el ambiente, al igual que sus talos disminuyeron su tamaño de 15 ± 5 cm en la estación de la Universidad de Medellín y de 1 ± 2 cm en el edificio Miguel de Aguinaga, en el punto de monitoreo de la Universidad de Medellín encontraron líquenes de las especies *H. speciosa* (Wulf.) Trev. y *Canoparmelia* sp con estructuras reproductivas y estas estructuras no nacen en ambientes expuestos a contaminación lo que lo convierte en un indicador de la calidad del aire. Ya para concluir los resultados obtenidos con los líquenes si evidenciaron y confirmaron las alteraciones de la calidad del aire para partículas suspendidas totales (PST) en la estación de monitoreo del Edificio Miguel de Aguinaga que reportó la RedAire en el periodo de años 2004 y 2007 y de las 8 especies halladas las más sensibles y aptas para estudios de la calidad atmosférica en el Valle de Aburrá son *Canoparmelia* sp. y *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr) Hale, (Jaramillo & Botero, 2010).

En Quibdó, capital del departamento del Chocó cuenta con bastantes bosques tropicales y pluviales, por lo que hasta hace unos años atrás a simple vista se podía decir que era un municipio libre de contaminación atmosférica, pues su principal actividad es la agricultura, minería y pesca, pero desde hace unos 100 años poco a poco ha venido aumentando el flujo vehicular y más con la actividad de moto taxis, además de la compra

de carros particulares, por lo que se presume que ahora si debe existir contaminación atmosférica por la acumulación de gases de la quema de combustibles fósiles en la parte urbana, razón por la cual se hizo un estudio con la sensibilidad de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Escogieron 4 puntos de monitoreo dentro del área urbana y en cada punto seleccionaron 10 árboles, el **sitio 1:** queda en la cra 5 en el centro de la ciudad con un importante flujo vehicular y se seleccionaron los 10 árboles, donde 2 son de las especies *Piper arboreum* Aubl., y 8 de *Ficus benjamina* L., el **sitio 2:** fue en el barrio San Nicolás, sector las brisas y también tiene buen tránsito vehicular donde seleccionaron 2 de la especie *Ficus benjamina* L., 2 de *Syzygium malaccense* (L.) Merr. y L.M. Perry, de Lauraceae sp., 3 de *Spathodea campanulata* P. Beauv. Y 3 de *Anacardium occidentale* L., el **sitio 3:** fue en la Universidad Tecnológica del Chocó, esta se encuentra rodeada por 2 rutas de tráfico vehicular, seleccionaron 1 de la especie *Cananga odorata* (Lam.) Hook.f. & Thomson, 1 de *Caryota urens* L., 4 de *Spathodea campanulata* P. y 4 de *Terminalia catappa* L. y el **sitio 4:** correspondió en la parte rural, más exactamente a 6.5 km del área urbana en el corregimiento de Pacurita rodeado de bosques con una tal cual tala selectiva donde escogieron las siguientes especies arbóreas: 1 de *Calophyllum brasiliense* Cambess, 1 de *Marila dolychandra* Cuatrec., 1 de *Heisteria acuminata* (Humb y Bonpl) Engl., 5 de *Guatteria amplifolia* Triana y Planch y 2 de *Eschweilera integrifolia* (Ruiz y Pav. ex Miers) R. Knuth. Recolectaron los líquenes con espátulas a 1.50 m de altura de cada árbol seleccionado donde calcularon los índices de Simpson, pielou y Margalef para estimar la diversidad y dominancia de los líquenes, encontraron 15 familias liquénicas donde se observó que el 53.3% están presentes en la zona urbana con alta movilidad vehicular destacándose las familias *Parmeliaceae*, *Physciaceae* y *Coccocarpiaceae*, donde

aparentemente son especies tolerantes a la contaminación y el otro 46.7% de familias *Lecanoraceae*, *Thelotremaaceae* *Arthoniaceae* y *Pertusariaceae* se encontraron en el área rural donde hay baja o nula movilidad, lo que arroja que son especies sensibles a la contaminación y las familias *Cladoniaceae*, *Collemaaceae*, *Roccellaceae* y *Crocyniaceae* fue muy escasa su presencia en los 4 sitios muestreados; en este estudio fue demostrado que los líquenes sirven como bioindicadores de la calidad del aire en un municipio sin industrialización. Es decir también resultan sensibles en un ambiente no muy contaminante relativamente, ya que variables como la abundancia, composición, riqueza y cobertura de líquenes tanto costrosos como foliosos brindan importante información en el área de estudio, ya por último las siguientes familias liquénicas son las recomendadas como bioindicadoras de la calidad del aire en el Municipio de Quibdó y otras ciudades del mismo departamento (Chocó) *Lecanoraceae*, *Thelotremaaceae*, *Arthoniaceae*, *Pertusariaceae*, *Coccocarpiaceae*, *Lobariaceae*, *Parmeliaceae* y *Physciaceae* (Valois & Mosquera, 2014).

En la ciudad de Bogotá con 7'181.469 millones de habitantes según el último censo, es el centro industrial de toda Colombia y cada vez más aumenta la emisión de contaminantes atmosféricos, convirtiéndose en un foco de enfermedades respiratorias siendo esta la principal causa de mortalidad y morbilidad de niños menores de cinco años y adultos mayores. Teniendo en cuenta lo anterior en Bogotá es prioridad monitorear la calidad del aire desarrollando estrategias que controlen y regulen la contaminación, ya que Bogotá cuenta dentro de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire con sólo 13 estaciones fijas y una móvil, lo cual es muy poco o no es suficiente para una ciudad tan grande. Por tal razón, Figueroa en su estudio decidió implementar líquenes como organismos bioindicadores para ayudar a ampliar la evaluación del aire en más zonas de la ciudad de

manera más económica evaluando si la riqueza/abundancia están relacionadas directamente con la contaminación en 8 áreas de la ciudad (Guaymaral, carpas, Simón Bolívar, Tunal, Kennedy, Ministerio del Medio ambiente, Fontibón y las Ferias). Se realizó el monitoreo a 500 metros de cada área donde se tuvo presente que los árboles tuvieran líquenes, donde se calcularon dos IPA, se calculó el índice de Shannon y además evaluó los resultados de estos análisis con la correlación de Spearman y de las concentraciones de Óxido de Azufre(SO_x), Monóxido de Carbono (CO), PM₁₀ y (NO_x) por ser los contaminantes con más emisión procedentes de la combustión de carbón y petróleo con los datos ya existentes registrados y hallados con método tradicional por la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de Bogotá, donde según la correlación y análisis no se halló significancia entre los contaminantes y el IPA la que tuvo menos concentración de contaminantes fue el Simón Bolívar y a su vez fue la que registró mayor abundancia y cobertura liquénica, con la existencia de especies sensibles a la contaminación, las otras 7 áreas si fueron halladas zonas de máxima contaminación, donde se pudo observar baja cobertura y riqueza de líquenes, en Kennedy no se encontró ninguna especie. Concluyendo que la calidad del aire varía en cada zona de la ciudad y esto depende de factores como los árboles, fuentes de contaminación y la dirección del viento determinan la calidad del aire de cada zona. Se encontraron especies como *Candelaria concolor* con crecimiento foliosos en Tunal, Las ferias, Fontibón, *Chrysothrix* sp con crecimiento costroso presente en el tunal, *Flavopunctelia flaventior* con crecimiento folioso se encontró en Tunal, Guaymaral, Sagrado corazón, Corpas, Fontibón, Simón Bolívar, *Parmotrema* sp con crecimiento folioso se encontraron en Tunal, Guaymaral, Simón Bolívar, *Punctelia* sp y *Physcia* sp con crecimiento folioso se encontró únicamente en el Simón Bolívar, con crecimiento

fruticoso presente en el simón Bolívar, predominó el crecimiento folioso representativo de la región Andina según Aguirre (2008) Sipman (2011), sólo una especie con crecimiento costroso ya que este crecimiento pertenece a sitios con bajas altitudes, es decir a regiones tropicales. La comunidad liquénica resultaron ser buenos bioindicadores de la calidad del aire ya que se puede notar su disminución de especies altamente sensibles en zonas altamente contaminadas y la presencia de especies sensibles en zonas de baja contaminación (Figuroa, 2015).

❖ Estudios extranjeros:

En la ciudad de Cochabamba en Bolivia aplicaron líquenes epifitos de la especie *Fraxinus americana* como herramienta de monitoreo de la calidad del aire, teniendo en cuenta que una ciudad genera mayor actividad y así mismo se genera mayores impactos de contaminación, especialmente por la quema de combustibles fósiles que producen variedad de gases contaminantes, en el estudio hicieron uso del método de Índice de Pureza Atmosférica (IPA), en cada punto de monitoreo recopilaron todas las medidas climáticas, definieron la cobertura y repetición de líquenes para posteriormente hacer el análisis por Spearman, senderos y Cluster. Comprobaron de esta manera que existe contaminación atmosférica por dióxido de nitrógeno (NO₂) y Material particulado (PM₁₀) afectando directamente a los líquenes epifitos por otra parte, también los parámetros climáticos contribuyen indirectamente en su afectación, en la época más fría aumentó la contaminación y así mismo disminuyó la presencia de líquenes, identificando que las especies más tolerantes a la contaminación fueron *Physcia pachyphylla*, *Pyxine nubila*,

Candelaria concolor y con tolerancia media *Punctelia subrudecta*, *Flavopunctelia flaventior* y *Phaeophyscia*, seguida de otras especies sensibles como la *Lepraria ecorticata* y *Physcia undulata* y las más sensibles con índices a desaparecer fueron *Teloschistes chrysophthalmus* y *Hyperphyscia syncolla*. Por otro lado, se observó tolerancia por parte de los líquenes al ozono (O₃), por medio del IPA evidenciaron que los líquenes son eficientes para medir la calidad del aire (Gonzales *et al.*, 2016).

En la ciudad de Santa Fe, Argentina se llevó a cabo un estudio de líquenes para evaluar su actividad bioindicadora haciendo comparación con sitios de control ya instalados en la ciudad con respecto a la contaminación del aire por metales pesados, en sitios potenciales de contaminación del epicentro de la ciudad, muestrearon 2 especies líquénicas *Parmelia caperata* y *Tillandsia recurvata* presente en árboles de tres áreas verdes con un elevado flujo vehicular, donde hallaron acumulación de metales pesados en sus estructuras como el Zinc (Zn), Magnesio (Mn) y Hierro (Fe) por medio de aspiración directa y absorción atómica, estos métodos son los más adecuados para identificar metales pesados. También llevaron a cabo dos zonas suburbanas con un menor flujo vehicular, donde las destinaron como sitio de control, los valores obtenidos de metales pesados fue mucho menor en esta área de control, por lo que en el epicentro de la ciudad las dos especies líquénicas recibieron una mayor concentración, en especial el hierro lo que confirma el mayor tránsito vehicular, más la presencia de material particulado además de zonas industriales, concluyendo finalmente en estudio que estas dos especies de líquenes estudiadas tienen un gran potencial para ser utilizadas en los monitoreos y diagnósticos de la calidad del aire (Ghirardi *et al.*, 2011).

En las últimas décadas se han dirigido gran número de estudios hacia la búsqueda de indicadores de la calidad del aire, que representan el único modo de integrar y cualificar el grado de calidad del aire de una zona concreta. En el momento en que la reacción de estos indicadores se puede relacionar cuantitativamente con concentraciones de contaminantes en la atmósfera, se convierten en bioindicadores de la contaminación atmosférica. En el centro septentrional de la provincia de León y los alrededores de la localidad de La Robla - España se ha llevado a cabo un estudio de bioindicación atmosférica puesto que es un sitio con un flujo de contaminación alto de tipo ácido y por muchos años atrás vienen intentando disminuir el aumento de contaminantes tóxicos que afectan la calidad del aire, especialmente en sitios industrializados y que acarrear problemas, teniendo en cuenta los líquenes epífitos para hallar el IPA y alteraciones en todo el entorno. Además de los líquenes son reconocidos mundialmente como los más sensibles antes la presencia de varios contaminantes en la atmósfera, este estudio se llevó a cabo 10 años después, analizando y comparando los datos obtenidos por Terrón y Barreno en 1994 con los datos tomados en 1999. Los líquenes cuando detectan la presencia de contaminantes lo primero que se afecta es el fitobionte y luego se le empieza a dañar el talo causando la desaparición del liquen, finalmente en cuestión de meses, haciendo biomonitoreo seguidos se podrá notar la variación y cambios en los líquenes, lo que indica la existencia de agentes tóxicos que afectan la calidad del aire. Para este estudio tomaron en cuenta 43 estaciones de muestreo donde seleccionaron a *Quercus pyrenaica* como forofito y de cada estación seleccionaron 5 árboles cada uno con diámetros de 30 a 40 cm, se analizaron los datos mediante el Análisis de Componentes Principales para ordenar y para clasificar mediante el análisis de Cluster, de esta manera al final analizaron los datos

obtenidos en la actualidad con los de hace 10 años, donde los valores del IPA son muy similares, lo que indica que en la diversidad liquénicas no ha habido mayores cambios en la década que pasó, a diferencia del Dióxido de azufre (SO₂) que sí tuvo un pequeño aumento de sus inmisiones. También se pudo observar mayor frecuencia de especies toxitolerantes favorecidas por el aumento de las inmisiones de los contaminantes, especies como *Evernia prunastri* y *Parmelia sulcata* se mantuvieron de forma parecida ya que las dos desaparecieron en áreas más contaminantes y en áreas menos contaminantes fue aumentando su presencia indicando su toxisensibilidad. Por lo tanto, estas dos especies se les aporta como buenas bioindicadoras, en cambio especies *Physcia aipolia* y *Xanthoria parietina* tienen alta presencia en la zona con más contaminación lo que las convierte en especies muy toxitolerantes (Fernández *et al.*, 2007).

En la ciudad de Pontevedra, España determinaron la calidad del aire mediante bioindicadores liquénicos, pretendiendo establecer el grado de contaminación actual de esta ciudad ya que es una ciudad pequeña pero con 60 empresas fuentes de contaminación, especialmente Elnosa y Ence donde sus procesos industriales son fuente de gases tóxicos y partículas, para este estudio mediante líquenes escogieron 19 estaciones y utilizaron el índice de biodiversidad liquénica propuesta por Nimis en 1999 junto a la escala cualitativa adecuada para Galicia propuesta en los periodos 1987 – 1988 por Carballal y García para identificar las especies de líquenes por medio de estudios microscópicos y macroscópicos, además de pruebas de coloración en talo, apotecios y médula, para diferenciar e identificar las especies *Parmelinopsis minarum* y *Parmelina tiliácea* utilizaron técnicas de micro cristalización para separar los ácidos girofórico y lecanórico. Para las especies *Parmotrema stuppeum*, *P. austrosinense*, *Lepraria umbricola* y *L. conizaeoides* la técnica de

cromatografía en capa fina (TLC), los resultados arrojan un nivel bajo de contaminación atmosférica, sin embargo, la circulación de vehículos y las calefacciones son las dos fuentes de contaminación que resaltan en la ciudad, comparando estos resultados con unos de tiempo atrás se observa las mismas concentraciones de SO₂, dos estaciones aumentaron su contaminación teniendo en cuenta que son zonas peatonales muy frecuentadas del centro de la ciudad, mientras en 4 estaciones la contaminación disminuyó a partir de 1988, siendo estas zonas con poco tránsito peatonal, ya para concluir se puede decir que este estudio arrojó los mismos resultados de muchos una década atrás, esto debido a que en esta ciudad el aumento de la industrialización es escasa (González *et al.*, 2006).

En las ciudades aumenta los problemas de contaminación atmosférica, generalmente causadas por la actividad humana y en la ciudad de Tingo María - Perú no es la excepción pero se cuenta con muy poca información en el área urbana con respecto a la calidad del aire, por tal razón, llevaron a cabo un estudio de bioindicación de la calidad del aire con el uso de líquenes epífitos, donde eligieron zonas más transitadas por vehículos y otra con menor concurrencia vehicular, tomaron en cuenta 5 zonas donde eligieron 5 especies arbóreas completamente sanos de *Terminalia catappa* (almendro), para el monitoreo de líquenes utilizaron la cartografía de líquenes, también calcularon el IPA a partir de la frecuencia liquénica y número de árboles presente en cada punto de estudio, en cada zona eligieron un punto fijo para realizar conteo vehicular en horas pico cada 5 minutos. Las especies liquénicas identificadas con mayor frecuencia fueron *Hyperphyscia cf. Pyvithrocardia* y *Physcia cf. Lopezii* con un promedio de 9, donde demostraron ser altamente frecuentes y tolerantes a la contaminación, mientras que la especie *Chrysothrix candelaris* fue escasa su presencia en las 4 zonas con alto flujo vehicular y en cambio en la

zona con escaso flujo vehicular su presencia tuvo un significativo aumento, demostrando de esta manera ser la especie más sensible, como resultado los líquenes por ser mutualistas presentan resistencia o sensibilidad a los niveles de contaminación atmosférica, lo que ocurre en ellos es que al existir contaminación produce deterioro en las especies sensibles y así mismo, son reemplazadas por líquenes tolerantes. El presente estudio fue llevado a cabo en plenas lluvias y es importante resaltar que la lluvia disminuye los grados de contaminación, mientras que la humedad si contribuye a la contaminación porque ayuda en la acumulación de humos y polvo, por otra parte según los resultados del IPA en las zonas con alto tráfico vehicular donde la máxima llega a 2002 carros por hora, la contaminación es moderada y en la zona con poco tránsito (56 carros por hora) fue muy baja o no hubo contaminación, es de resaltar que esta zona cuenta con bastantes áreas verdes (Quispe *et al.*, 2015).

En los últimos años se ha visto la necesidad de implementar nuevas fuentes de energía diferente a la de los combustibles fósiles que genere menos costo pero que también sea amigable con el medio ambiente, por tal razón en Lima –Perú se procedió a realizar un artículo de revisión sobre los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire para el desarrollo de energía geotérmica, esta fuente de energía es poseída de la corteza terrestre, el manto y el núcleo. Allí existe grandes concentraciones de temperatura llegando a exceder los 5800°C, lo que la hace una fuente de energía renovable, en cuenta que en la etapa explorativa pueden existir posibles alteraciones ambientales como lo es la emisión de gases contaminantes, por tal razón Valdivia & Iannacone (2018) decidieron evaluar aspectos teóricos relacionados con la contaminación atmosférica causada por la implementación de la energía geotérmica y el uso de líquenes como bioindicador para

ejercer un biomonitoreo frente a los potenciales cambios de la calidad del aire que puedan ocasionar, Perú tiene un potencial geotérmico por estar dentro de la línea del anillo del fuego del pacífico, por tal razón desde el 2007 Japón le brinda apoyo técnico y económico ya que en estudios previos han sido factibles para la generación de energía geotérmica de dos campos llamados Boratera y Calientes. La energía geotérmica comparado con los combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón) es una fuente limpia y sostenible, sin embargo, esto no la libra de ciertas alteraciones en el ambiente tales como afectación del suelo, riesgos de subsistencia y sísmicos, ruido, líquidos, descargas químicas al agua y aire, emisión de gases y residuos de operación, construcción y desmantelamiento, que en su mayoría son impactos temporales. En cuanto a la contaminación atmosférica es por los gases geotérmicos descargados, siendo los principales contaminantes el CO₂, sulfuro de hidrógeno HS, metano 2 (CH) y mercurio (Hg), además del boro (B), radón (Rn) y amoniaco (NH), es importante resaltar que el CO₂ su emisión es mucho menor comparado con otras fuentes de energía y esto es un aporte significativo en gases de efecto invernadero por otra parte, el más preocupante es el HS por su toxicidad en plantas y humanos, estos 2 últimos gases por ser pesados tienden a concentrarse y aquí es donde entran los líquenes a jugar un rol importante como red de biomonitoreo en largos periodos para evaluar la condición ambiental de determinada zona con actividad geotérmica. La aplicación de los líquenes se pueden llevar a cabo por medio de 3 métodos diferentes: el primero es el mapeo de especies liquénicas, aquí se halla el IPA permitiendo evaluar el grado de contaminación de determinado lugar y se basa en número, frecuencia y tolerancia de los líquenes, el segundo método es el trasplante de líquenes de áreas con baja o nula contaminación a sitios contaminados y estudiar los cambios en su desarrollo fisiológico y

morfológico, y el tercer método es el muestreo de líquenes que consiste en recoger muestras de los líquenes y evaluar la acumulación de contaminantes en los talos, ya que estos exceden sus funciones fisiológicas y tienen dos opciones, tolerar altas concentraciones contaminantes o desaparecer; a partir de 1980 iniciaron estudios en Italia con muestreo de líquenes en zonas con plantas geotérmicas donde la presencia, cobertura y acumulación de sustancias contaminantes en los líquenes establecían la condición ambiental del sitio estudiado. Es importante tener conocimiento con antelación de la condición ambiental en que se encuentra cierta área de estudio y de esta manera conocer la alteración real cuando se instalen las actividades geotérmicas y/o cualquier otra actividad, más aún si van a ser los líquenes los que van a prestar la función de biomonitoreo. Loppi en Italia en el año 1998 aplicó el IPA con líquenes en el área Travale Radicondoli para evaluar la contaminación derivada de emisiones de plantas geotérmicas donde los resultados arrojaron que a 500 metros de las plantas geotérmicas los valores fueron bajos indicando una mala calidad del aire, siendo los contaminantes emitidos de las plantas geotérmicas las responsables, concluyendo en este y otros estudios que los líquenes son efectivos como bioindicadores de la calidad del aire en áreas con actividades geotérmicas, siendo eficientes tanto cuantitativamente como cualitativamente y como resultado está la presencia o ausencia de los líquenes ante los diversos grados de contaminación.

Guatemala es una ciudad altamente poblada lo que conlleva a un aumento de la contaminación atmosférica por procesos industriales, erupciones volcánicas, erosiones eólicas, urbanización y consumo de combustibles, en el día circulan 770.000 vehículos causante de SO₂, NO₂, metales pesados, ozono, compuestos químicos orgánicos y partículas en suspensión, lo peor de todo es que en esta ciudad no tienen ninguna norma

que regule estas emisiones y así mismo, las concentraciones atmosféricas que los mismos generan. El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social reportó para el año 2011 2,039,924 casos de enfermedades respiratorias agudas y 8,781 casos de muertes por la misma causa de afectación respiratoria, este motivo hace que sea necesario realizar monitoreos continuos buscando un método que sea económico, ya que faltan recursos para implementar el método físico químico y es necesario encontrar con urgencia cuáles son las zonas con altos índices de contaminación para tomar medidas de mitigación, en el presente estudio utilizaron líquenes como bioindicadores de la calidad atmosférica en 32 puntos del metropolitano Hipódromo de norte a sur de la ciudad, en este trayecto se encuentra el centro industrial más grande, viviendas, recreaciones, comercio y el basurero, donde categorizaron el nivel de contaminación a través del IPA, y a su vez complementaron con cobertura con el Factor de Clasificación Ambiental (ECF) junto con el cambio en la diversidad líquénica en árboles de la especie *Jacaranda mimosifolia* D. Don. Donde hallaron 16 familias, 23 géneros y 65 especies, la familia *Physciaceae* cuenta con el mayor número de especies (20%), continuando con la familia *Graphidaceae* (13.5%), *Collembataceae* (9.2%), *Caliciaceae* (9.2%). En cuanto a las especies más frecuente en 27 de las 32 zonas fue *Candelaria concolor* (Dicks), seguida de *Hyperphyscia adglutinata* (Flörke). En 24 de los 32 puntos, donde 26 especies son nuevas dentro de los registros en todo el país de Guatemala, el 49% son especies con crecimiento costroso y el 51% son de crecimiento folioso, en cuanto a los valores del IPA indican que el trayecto de norte a sur tiene alta contaminación atmosférica ya que los valores varían de 4.5 a 35.5, los puntos con mayor contaminación del aire fueron el punto 5 (INCA) y punto 13 (Parroquia Santa Marta) donde el IPA arrojó los menores valores y los mayores valores fueron en los puntos

28 que queda en la Universidad Marroquín y 21 en Avenida las Américas siendo los sitios con menor contaminación, las zonas con escasas de líquenes son los sitios más transitados como la parte comercial, avenidas principales y 5 parques principales pero que están bastante afectados por el tráfico vehicular de su alrededor. Por otra parte, y teniendo en cuenta el índice Ecológico Q las especies foliosa más tolerantes a la contaminación son *Mayrhofer & Poelt*, *Hyperphyscia adglutinata* (Flörke), *Physcia caesia*, *Physcia stellaris*, *Leptogium azureum*, *Candelaria concolor* (Dicks.), *Leptogium milligranum* Sierk, *Physcia aipolia* y las más sensibles a contaminación urbana *Heterodermia granulifera* (Ach.) W.L. Culb y *Parmotrema crinitum* (Ach.) M. Choisy. Los resultados señalan que la comunidad líquénica complementan perfectamente al método físico químico en la contaminación del aire y más en sitios donde no se cuenta con equipos sofisticados de ninguna índole, estas especies tienen un alto potencial para indicar cualquier problema ambiental (Cohn, 2014).

Llatance (2017) evaluó la calidad aérea de una microcuenca del Lago Pomacochas de la provincia Bongará departamento de Amazonas – Perú, el objetivo de este trabajo fue determinar la calidad de aire de la Microcuenca del Lago Pomacochas, provincia Bogará, departamento Amazonas, teniendo en cuenta que en la región Amazónica no existe investigaciones sobre la calidad del aire y la idea es hallar la calidad del aire por medio de los diversos usos del suelo de la microcuenca del lago Pomacochas. Para ello se establecieron 530 estaciones de monitoreo en 10 diversos tipos de usos de suelo, en cada estación seleccionaron 3 árboles de la especie *alnus acuminata*, donde se halló la riqueza de especies líquénicas a través del método de Shannon Wiener donde establecieron diferencias entre el IPA y el Índice de Pureza Atmosférica Modificado (IPAM) en cuanto a los diferentes usos de suelo con el análisis de varianza, con el fin de determinar la calidad

de aire; el resultado nos da la existencia de cinco tipos de calidad de aire de acuerdo a la naturalidad del suelo y alteración, en los usos de suelo Tejido Urbano Continuo y Pastos Limpios muestran una calidad de aire con alteración media, en la cual se ve una intervención antrópica significativa y los usos de suelo Bosque Denso Alto, Vegetación Herbácea/Arbustiva y Mosaico de Cultivos una calidad de aire con una naturalidad media y con una mínima intervención antrópica. En los 10 tipos de uso de suelo siempre hubo mayor cantidad de líquenes crustáceos y esto concuerda con Hale quien dijo en 1969 que los líquenes crustáceos tienen más tolerancia a la toxicidad del aire y los fruticulosos son los más sensibles y en efecto este tipo de liquen no tuvo presencia en 66 estaciones, justo estas estaciones dieron un IPA bajo, lo que indica su alta sensibilidad a la mala calidad del aire, con la única excepción de las especies *Ramalia* sp.1 que es un liquen de tipo fruticuloso y *Parmotrema* sp.2 un liquen folioso que con el tiempo se pudieron adaptar a la contaminación media y lograron ser tolerantes, las comunidades de líquenes epífitos resultaron ser excelentes bioindicadores biológicos para detectar zonas de mayor y menor calidad de aire.

Buenos Aires, Argentina una ciudad donde en los últimos años ha tenido un desarrollo urbanístico asombroso, al punto de eliminar zonas verdes para el desarrollo y construcción de viviendas, calles, pavimentación, autopistas y como resultado se obtuvo pérdida de biodiversidad significativa, en general en Argentina las ciudadanías no tienen conciencia sobre los problemas ambientales y por supuesto tampoco hay participación por parte de ellos. Por tal razón Senatore & Borzino (2014), dos profesoras junto a sus estudiantes decidieron llevar a cabo un estudio con líquenes para determinar la calidad del aire y a su vez educar ambientalmente a la población enseñando que se puede evaluar la

calidad del aire de su entorno de una forma práctica y económica, tomaron las muestras de líquenes en árboles con corteza sana dentro de las zonas del colegio, de espacios verdes cercanos y de una reserva ecológica costera del sur. Al igual muestrearon sobre las paredes del colegio con una altura de 1.50 metros, cabe resaltar que para identificar las especies arbóreas utilizaron una guía de orientación donde se anotaron el tipo de especie, si era nativa o exótica, la ubicación del predio, el tipo de líquenes encontrados y área cubierta; donde concluyeron que no había contaminación ya que encontraron presencia liquénica.

En las Sierras de Tandilia - Buenos Aires se profundizó en las comunidades liquénicas teniendo en cuenta su gran potencial como bioindicadores de la contaminación atmosférica, para esto se identificó y caracterizó las familias de líquenes saxícolas, también se halló las variables del medio en que están relacionadas junto a los patrones que distribuyen los líquenes saxícolas y contrastarlos con los líquenes cortícolas existentes en la zona, también se analizó y comparó la viabilidad de monitoreo de la calidad del aire en esa región de la sierra por medio de los líquenes. Para finalizar se definió los criterios para el monitoreo en esta región conforme las características y potencial de las especies liquénicas presentes en el desarrollo de este estudio hallando una gran diferencia entre los líquenes cortícolas en árboles urbanos, nativos y líquenes saxícolas, se encontró que en las rocas de la sierra Tandil crece 71 especies liquénicas que pertenecen a 21 familias y 36 géneros, además se puede observar que esto depende de la exposición y sitio topográfico de las laderas; las especies que con más frecuencia mostraron fidelidad a distintos biotipos fueron *Flavoplaca austrocitrina* y *Caloplaca cinnabarina* que permanecen expuestas al pleno sol del día, también está las familias de *Haemmatoma montevidensis* y *Usnea amblyoclada* presentes en rocas altas y las *Parmotrema cetratum* & *Parmotrema*

tandilense presente en roquedales bajos. En los árboles se identificó 20 especies que pertenecían a 5 familias y contenían 12 géneros distintos, por otra parte, encontró 7 especies de corticícola diferentes de los saxícolas. En el presente estudio se analizaron las potenciales actividades industriales en la sierra de Tandil que podían afectar la calidad del aire con sus emisiones, teniendo en cuenta los catálogos de US EPA 1995b y para valorar el potencial bioindicador de los líquenes se tuvo en cuenta el método directo que consiste en la bioacumulación de contaminantes sobre talos corticícolas y saxícolas, posteriormente analizarlos por dispersión de electrones y espectroscopia producido por láser, además medir parámetros magnéticos e indirecto que consiste en utilizar índices. También se aplicó el IPA donde arrojó que el 65,93% de industrias correspondientes a 4 focos de emisiones fueron las que emitieron contaminantes como CO, SO₂, N, Cl, fósforo (P), Fe, Al y Zn, 3 son pertenecientes al área urbana que representan la mayor magnitud de contaminación y 1 localizada en el parque industrial. Los resultados dieron a conocer acumulación de elementos tóxicos en talos cortícolas de especies como *Punctelia hypoleucites*, *Dirinaria picta*, *Hyperphyscia viridissima*, *Parmotremapilosum* y en talos saxícolas especies como *Xanthoparmelia microspora*, *Punctelia borreri* y *Usnea amblyoclada*; en este estudio se puede concluir que en las Sierras de Tandil se pueden utilizar los líquenes saxícolas como bioindicadores ya que fue posible diferenciar su efecto individual en el medio natural sobre la distribución de especies, a su vez la distribución de comunidades con el efecto de la contaminación sobre comunidades específicas y la composición química de sus talos, por otra parte, la emisión de contaminantes no metales es producido por 13 industrias donde contiene cloro en un 14.29%, sílice 8.79%, Fósforo 5.49% y azufre 2.20%; y la emisión de metales las produciría 52 industrias, donde el

36.26% corresponde a hierro, Aluminio 23.07% y Zinc 17,58%, y un 16,48% de metales pesados como cadmio, cobre, cadmio, cobalto, magnesio, mercurio y cromo (Lavornia, 2014).

En zonas distantes de la Patagonia en Argentina se realizó un estudio sobre la calidad del aire sobre la zona urbana de esta ciudad para analizar la contaminación atmosférica sobre los efectos que tiene en líquenes, aplicaron el cálculo de IPA para zonas urbanas contaminadas y periurbanas aparentemente no contaminadas a la ciudad de Bariloche. Donde los resultados obtenidos fueron relacionados con la composición natural del talo de los líquenes para finalmente analizar haciendo uso del método de Ward, donde se dio a conocer 3 grupos con valores de los talos y del IPA, en áreas urbanas son afectados por contaminación debido a su cercanía a una estación de servicio que tiene un intenso tráfico vehicular, por otro lado los talos de la zona periurbana tuvo valores muy bajos de contaminantes atmosféricos y un valor de IPA bastante alto, lo que permite relacionar estos valores con las actividades humanas en estos lugares y evaluar la condición ambiental de ese lugar (Calvelo, 2009).

En una zona central termoeléctrica en el municipio de Canoas, Brasil a 20 kilómetros de la región metropolitana Porto Alegre, Río Grande do Sul, toda esta región es caracteriza por ser muy poblada y ser una zona urbano industrial, también tiene zonal alteradas por la degradación de bosque humedales desde hace 40 años que los han convertido en sitios para sembrar maíz y arroz, para el año 2003 tuvieron en cuenta especies liquénicas por su sensibilidad a los contaminantes atmosféricos como bioindicadores de la calidad del aire, dividieron el área en 4 sitios influenciados

directamente por la planta. Sitios que correspondiendo al jardín forestal de eucaliptos, bosque de arroyo Guajuviras, Mata el vertedero y Mata do apiário, tan sólo un sitio de influencia indirecta que fue el parque de exposiciones Assis Brasil, finalmente quedaron 5 áreas para ser evaluadas, donde se muestrearon 50 árboles de los cuales se pudieron registrar 45 taxones de líquenes pertenecientes a 23 géneros y 10 familias, de los cuales 5 de ellos muestran síntomas y efectos de contaminación atmosférica (*Usnea* sp, *Teloschistes exilis*, *Physcia aipolia*, *Parmotrema tinctorum* y *Heteroderma obscurata*), los siguientes taxones fueron registrados en un 80% de los sitios *Punctelia graminicola*, *Parmotrema tinctorum*, *Lecanora pallida*, *Dirinaria picta* y *Canoparmelia texanase* seguidas de *Physcia aipolia* y *Parmotrema praesorediosum* presentes en un 60% de las zonas estudiadas, *Dirinariapicta*, *Canoparmeliatexana* y *Puncteliagraminicola* resultaron ser especies tolerantes a la contaminación con presencia en todas las áreas a excepción del jardín forestal de Eucaliptos, las especies costrosas presentaron la mayor diversidad y riqueza perteneciente a un 88.9% en el área del jardín forestal y la Mata colmenar, esto pudo deberse a la baja cantidad de forofitos para el desarrollo de mycota liquénica y es una zona que predomina el eucalipto. La mayor cantidad de especies foliares estuvieron presentes en la Mata do apiário 75% y el parque de exposiciones Assis Brasil 77.3%, teniendo en cuenta que las zonas analizadas son influenciadas de forma directa por actividad del hombre, inciden muchos factores que afectan la calidad del aire, además de otros causantes como el tráfico vehicular e industrias muy cercanas que generan SO₂, y la planta termoeléctrica que genera contaminantes como CO, NO_x y CO₂, por otra parte, se pudo observar y según resultados los líquenes solo se encuentran en zonas con las mejores condiciones para su crecimiento y desarrollo, teniendo en cuenta que sufren las

consecuencias de la contaminación atmosférica generada por actividades antropogénicas de la planta termoeléctrica y sus alrededores, sin embargo algunas especies se han convertido en tolerantes a la contaminación a raíz de la desaparición de especies muy sensibles, lo que es de su conveniencia porque se apoderan de todo el territorio (Azevedo *et al.*, 2008).

En el asentamiento de Dimitrovgrad, Serbia sudoriental no conocen el estado de la calidad del aire y tuvieron la necesidad de hacer un monitoreo donde utilizaron líquenes como bioindicadores para así lograr establecer en qué nivel de contaminación está el aire, este asentamiento tiene industrias no muy desarrolladas y sí un extenso tráfico vehicular, así que tomaron en cuenta 13 puntos o zonas urbanas, se tomaron muestras de las especies de árboles *Juglans regia L*, *Hacer negundo L*, *Tilia Platyphyllos Scop*, *Prunus domestica L*. donde hallaron 19 taxones líquénicos pertenecientes a 11 géneros, donde las especies más frecuentes fueron *Xanthoria parietina* y *Phaeophyscia* presente en un 69.2%, *Lecidella elaeochroma* 53.8%, *Candelariella canthostigma* 46.1%, *Physcia stellaris*, *Physcia adscendens* y *Buelia punctata* 38.4%. Mediante el IPA se hallaron 3 zonas con contaminación atmosférica está la zona normal, zona de transición y desierto de líquenes, esta última zona tiene mayor nivel de contaminación está ubicada en la parte centro y sur de la parte occidental de la ciudad, así mismo, las especies con mayor tolerancia fueron *Phaeophysci orbicularis*, *Physconia distorta*, *Physcia adscendens*, *Physconia grisea* y *Xanthoria parietina* y las especies más sensibles fueron *Evernia Prunastra*, *Parmelia sulcata*, *Ochrolechia pallescens* y *Physcia tenella* (Stamenković *et al.*, 2010).

En el centro de Italia en la ciudad de Arezzo utilizaron líquenes epífitos como bioindicadores de la calidad del aire, siendo la peor calidad del aire en el centro de la

ciudad por el intenso tráfico vehicular y además el viento es muy escaso, en 1994 en los meses de marzo a octubre tomaron en cuenta 15 sitios para muestrear haciendo uso del método IPA y así conocer el grado de contaminación atmosférica teniendo en cuenta el número, toxicidad y frecuencia de líquenes en cada uno de los sitios seleccionados, se hallaron 51 especies liquénicas lo cual es una cantidad muy significativa y esto puede deberse a la disminución del dióxido de azufre (SO₂), que las especies estén recolonizando nuevamente, los valores más altos del índice de pureza atmosférica se obtuvieron en el sureste de la ciudad. Esta zona está expuesta a vientos moderados y además no hay mucho tráfico vehicular. Se encontraron altos niveles de CO y NO producto de los gases emitidos por automotores, siendo esta la principal fuente de contaminación, también se encontró niveles de SO₂ en bajas concentraciones. Por otro lado, los factores que influyen en la presencia, ausencia y/o frecuencia de los líquenes depende de la intensidad de contaminantes como NO, CO y SO₂, una de las recomendaciones que dan los autores es limitar el tráfico vehicular en la ciudad (Loppi *et al.*, 1996).

Un estudio realizado en la provincia de Sabaraga Sri Lanka país en Asia del sur con líquenes cortícolas en áreas rurales y urbanas de los trópicos, puesto que su presencia y diversidad se ha visto muy limitada en estos ecosistemas de los trópicos, este estudio tenía como objetivo relacionar los líquenes con contaminantes como el NO₂ y SO₂, se tomaron en cuenta 9 zonas de muestreo cada una con 3 sitios de submuestreo para un total de 162 árboles de las especies *Cocos nucifera* y *Mangifera indica*. Los niveles de contaminación de cada sitio se muestrearon mediante muestreadores pasivos de aire, también se llevó a cabo el IPA con la diversidad de líquenes dando como resultado una correlación negativa entre los niveles de NO₂ y SO₂, además el género *Pyxine* tuvo presencia en la mayoría de

sitios urbanos por lo que demostró ser un bioindicador tolerante a la contaminación atmosférica urbana y según la técnica cartográfica que se basa en índices puede ser utilizada con éxito para mirar los efectos de contaminación en ecosistemas urbanos, estos resultados demuestran que los líquenes cortícolas tienen un gran potencial para ser tenidos en cuenta en procesos de evaluación y monitoreo ambiental de la calidad del aire tanto en áreas urbanas como en áreas rurales (Yatawara & Dayananda, 2019).

En el Himalaya seleccionaron especies liquénicas para monitorear la variación climática de este lugar, se estudió los metales pesados y el PAH en diversas altitudes del Himalaya occidental en tres especies *Pyxine sorediata*, *Phaeophyscia hispidula* y *Flavoparmelia caperata*, estas especies fueron muestreadas en 14 sitios, en cada una de las altitudinales fue muy similar los resultados teniendo una mayor concentración *F. caperata* seguido de *P. hispidula* y por último *P. sorediata*, las diferencias pudo ser por atributos morfológicos de cada especie. Por lo tanto, las 3 especies demuestran ser eficientes para reflejar cambios ambientales en la zona, sin embargo la especie *F. caperata* tiene mayor capacidad bioacumuladora que las otras dos especies, en cuanto a los metales Cr, Al, Fe, Zn y Pb la especie *F. caperata* tiene mayor afinidad de bioindicación con estos metales, en cambio la especies *P. hispida* tiene afinidad para metales especialmente como el Fe y Pb; se establece que la combinación de parámetros junto con la implementación de técnicas geo estadísticas tienen gran potencial para establecer qué especie es mejor acumuladora de metales y de PAH, en nuestro estudio fue la especie *F. caperata* comparada con las especies *Pyxine sorediata* y *Phaeophyscia hispidula* en la región del Himalaya (Bajpai *et al.*, 2014).

En la Habana se utilizó la especie de líquen epifito *Physcia alba* sp por tener mayor distribución en esta ciudad, a esta especie le gusta su supervivencia en palmas real de la especie *Roystonea regia*, se seleccionaron 181 sitios teniendo en cuenta zonas con actividad industrial y tráfico vehicular que corresponden a 14 municipios donde se tomaron 225 muestras durante un periodo de 16 meses, en este periodo el tiempo tuvo mucha variación siendo mayoritariamente seco, fueron hallados 15 elementos contaminantes tales como: Mn, Cr, V, Ca, Al, Mg, Na, Pb, Cd, Sr, Zn, Cu, Ni, Co y Fe, hicieron uso de la técnica de espectrofotometría de absorción atómica, voltimetría de redisolución anódica y fluorescencia de rayos x, aunque no se encontró diferencias significativas con estos 3 métodos empleados estos métodos tienen un 95% de fiabilidad. Los componentes extraídos refleja los cambios existentes en las áreas urbanas de esta ciudad, debido a la presencia de contaminantes de gran importancia, con el biomonitoreo permitió evaluar estas anomalías y diferencias en la calidad del aire, por la tanto el uso de esta especie líquénica representó una gran ventaja comparado con los métodos instrumentales (Estévez *et al.*, 2011).

Estudios con abejas



Figura 5. Abeja *Apis mellifera*. Fotografía de Sergio Martín. (Guayatá - Boyacá, 2020).

❖ Estudios nacionales:

En los departamentos del Meta y Cundinamarca se evaluó la presencia de plaguicidas y metales en colmenas de abejas de la especie *Apis Mellifera* muy cercanas a zonas con cultivos de cítricos y fresas, tomando muestras de la miel producida, se llevó a cabo mediante la cuantificación por absorción atómica de llama y digestión por microondas teniendo en cuenta datos internacionales para evaluar estos contaminantes. Tomaron en total 62 muestras de miel de abejas ubicadas en cultivos cítricos y de fresa durante los años 2012 y 2013, realizaron la polinización inducida con el fin de utilizar las abejas y su miel como bioindicadoras de la contaminación por metales pesados tóxicos y plaguicidas; los resultados arrojaron la presencia de plaguicidas como: dimetomorf, pirimicarb, tebuconaol, carborufan y metalaxilo, estos plaguicidas en las abejas provocan efectos negativos en su desarrollo, malformaciones, alteración en su orientación y aprendizaje, reducción de olfato y problemas para reconocer la colmena y flores, también

se halló la presencia de metales pesados por debajo de los límites permisibles como Zn, Cu, Pb y Cd, estos metales en la miel además de poner en riesgo la salud de las abejas, también poner en riesgo la salud de las personas que consuman esta miel, estos metales provienen de las emisiones de fábricas, de metalurgias no ferrosas, industrias de fundición, emisión de combustibles como la gasolina con emisiones de Pb, también de los agroquímicos que contienen Hg y Cd, también se halló Hg un 0,25 mg/kg en cultivos de fresa y 0,22 mg/kg para los cultivos cítricos por lo que superan los límites máximos permitidos que es 0,05 mg/kg y esto indica que existe contaminación del alto riesgo para el medio ambiente y la salud de seres vivos que viven en esta zona, en humanos los metales se bioacumulan en el organismo al punto de alcanzar altos niveles tóxicos, ya que el cuerpo no los metaboliza y esta ingesta en la salud humana genera graves daños, inclusive hasta para las mismas abejas es riesgoso porque estos metales tóxicos presentes en la naturaleza se acumulan en ellas y posteriormente quedan atrapados en la miel. Las abejas por ser polinizadoras tienen contacto con muchos compartimentos, lo que les permite estar expuestas a diversas sustancias tóxicas, por tal razón, las abejas no sólo transportan contaminantes, sino que también los almacenan y concentran bioindicando de esta manera la presencia de sustancias nocivas en el ambiente (Zamudio, 2017).

En el corregimiento de la Gallera ubicado en Tambo, Cauca siendo esta una zona de amortiguación correspondiente al Parque Nacional Natural Munchique, se llevó a cabo un monitoreo con abejas silvestres, para esto determinaron las abejas presentes en la zona de estudio, cabe resaltar que los hábitats naturales han venido desapareciendo como consecuencia de actividades antropogénicas, como lo son el sobrepastoreo, la deforestación para el aumento de zonas agrícolas, por tal razón, estos ecosistemas tienden a desaparecer.

En estos ecosistemas están presentes ciertas especies de abejas silvestres que cumplen con características necesarias para ser considerados bioindicadoras, además de tener potencial para ser usadas como monitoreos ambientales, las veredas de estudio son La Gallera, El Rosal y El Cóndor, allí la gente vive de actividades agrícolas y ganaderas, por lo que dedican grandes fanegadas a cultivos de maíz, caña, granadilla, entre otros. Las muestras fueron tomadas en la vereda el cóndor en parte boscosa y en una parcela de restauración, en las veredas Gallera y Rosal se tomaron muestras en parte boscosa y en bancos de forraje, haciendo uso de trampas malaise, red entomológica y cineole para abejas euglosinas; en total se recolectaron 432 especímenes correspondientes a cinco familias ya registradas en Colombia, tales como Apidae, Megachilidae, Halitidae y Colletidae que corresponden a 19 géneros y 43 especies, en la vereda Rosal se encontraron 34 especies, en la vereda el Cóndor 18 especies y en la vereda La Gallera 9 especies, Apidae y Halictidae fueron las familias más abundantes. En cuanto a los géneros más abundantes fueron *Trigona Almeida*, *Parapartamona Schwarz* y *Partamona Schwarz* pertenecientes a las abejas sin agujón o Meliponini, hubo un nuevo registro y fue para la especie *Paratrigona eutaeniata Camargo* la cual al parecer es una especie muy sensible a ciertas alteraciones ambientales producidas por el hombre, la cantidad de especies en cada una de las veredas fue bajo, ninguna superó el 80% y esto se pudo deber a los métodos de muestreo, también se pudo concluir que los bancos de forraje es un recurso que aumenta la presencia de abejas silvestres (Fernández & Zambrano, 2011).

❖ **Estudios extranjeros:**

Un estudio realizado en un predio a las afueras de la ciudad Gualeguaychúcon, Argentina con la abeja melífera como bioindicadora y biomonitora ambiental cerca de cultivos de soja, para esto tuvieron que muestrear 3 gramos de abejas que fueron encontradas muertas durante un periodo de tiempo completo, que comprendió desde el mes de julio a marzo, es decir, durante toda la actividad de las abejas que equivale de 30 a 36 semanas, con un muestreo cada 7 días, es importante resaltar que el tiempo promedio de vida de una abeja es alrededor de los 100 días, pero a los 20 días de vida algunas abejas presentan un umbral de mortalidad natural, también desarrollaron una metodología para analizar y determinar el glifosato presente tanto en abejas muertas como en la miel y así mismo, correlacionar los contaminantes con las fumigaciones dentro de los cultivos de soja. La tasa de mortalidad de las abejas normalmente tienen que ver con muchos factores como la calidad y abundancia de flores, la parte genética, carga de sustancias extras como pesticidas, por otra parte, el monitoreo permitió recoger información de las posibles causas que provocan efectos negativos especialmente de los cultivos de soja sobre las especies de abejas *Apis mellifera*, también se pudo dar cuenta que el glifosato por su eficiencia es un herbicida con bastante uso en los cultivos de soja, este cultivo requiere de mucha demanda de pesticidas y el otro inconveniente es que el viento transporta el glifosato por el aire, por tal razón termina contaminando varias zonas y organismos, por eso el biomonitoreo con la implementación de abejas resulta ser eficiente para la evaluación de la contaminación medioambiental (Baldi *et al*, 2014).

En el parque industrial de la ciudad de Bahía Blanca, Argentina existe un polo petroquímico que genera al año 15.000 toneladas de contaminantes según el informe del Comité Técnico Ejecutivo en el año 2003, en esta zona las personas tienen que sufrir las

consecuencias de la contaminación y están preocupados porque está en riesgo su salud, allí se desarrollaron dos estaciones gemelas mediante el uso de abejas *Apis Mellifera* como bioindicadoras y biomonitores, en cada estación se ubicaron tres colmenas durante los meses de abril, mayo y junio del año 2006, las colmenas alcanzaron la mitad de tamaño de una colmena convencional con el fin de facilitar las observaciones y mejorar la instalación de sensores de humedad y temperatura en el interior de la colmena, el muestreo de las abejas se realizó con el mayor de los cuidados con un aspiradora manual que funciona con una batería *ad hoc*, para no quitar de sus cuerpos las partículas que se adhieren y acumulan, también realizaron un análisis estadístico donde establecen ciertas diferencias entre esta especie de abejas tanto biológicos, meteorológicos y comportamiento, los contaminantes escogidos a estudiar fueron tomados de las consultas de la Secretaría del municipio y el Comité Técnico Ejecutivo, que son los encargados de monitorear y controlar la contaminación, por tanto, los análisis que se trabajaron fueron sobre las abejas, el polen, cera y su miel; los análisis químicos que realizaron con los contaminantes escogidos fueron: metales pesados como el Hg, Zn y Cd; solventes orgánicos como el tolueno, benceno xileno y etilbenceno, además del hexano, Cloruro de vinilo, hidrocarburos aromáticos polinucleados y dicloroetano; los resultados dieron a conocer que la abeja *Apis mellifera* se adapta perfectamente a condiciones y ambientes industrializados sin demostrar alteraciones en su conducta ni biología, por lo que resultaron ser tolerantes a solventes orgánicos y metales pesados ya que en sus cuerpos fueron encontradas muestras de estos contaminantes (Gorza, 2007).

La revista Nature Sustainability publicó un estudio y análisis realizado por científicos sobre colmenas ubicadas en la zona urbana de la ciudad de Vancouver –

Canadá, donde encontraron bajos niveles de Pb, Zn, Fe y otras sustancias en la miel, especialmente en las colmenas que quedaron ubicadas en el puro centro de la ciudad, esto indica que la miel de las abejas se convierte en indicadora de la calidad del aire, teniendo en cuenta que las abejas mientras buscan el polen absorben residuos contaminantes presentes en la vegetación (flores y hojas) provenientes del aire, los científicos descubrieron una técnica llamada técnica isotópica para saber a partir de la composición química de las muestras de dónde proviene los contaminantes presentes en la miel, dado que las fuentes naturales de metales tienen sus propias características dependiendo de la proporción de isótopos del metal, en el caso de los isótopos del plomo se estableció que no eran proporciones locales ni de la naturaleza, sino de las emisiones del combustible de los vehículos y del combustible de los barcos que llegan a la bahía Vancouver, también de las zonas agrícolas y ferrocarriles, por lo que se puede afirmar es que la fuente de estos metales es artificial, esto demuestra que el uso de abejas y su miel como bioindicadoras son útiles para evaluar y monitorear calidad del aire (National Geographic España, 2019).

En la planta de cemento de minas en Francia llevaron a cabo un estudio con abejas, donde tomaron muestras en el sitio de exposición de la planta y en otro sitio ubicado a 18 kilómetros de la planta llamado sitio testigo, existe elementos metálicos tóxicos que a la más baja concentración llega a ser tóxico para los seres humanos llamados elementos traza, por eso en Francia propuso una lista de 9 elementos: Pb, Hg, As, Ni, Cr, Zn, Cu, Se y Cd, por tanto, las mediciones tomadas en estos dos sitios permiten analizar las concentraciones de estos elementos metálicos traza que se encuentran por añadidura en el medio ambiente y expuestos en la zona de estudio, cabe resaltar que el primer muestreo se debe hacer pasado los 50 días de haber instalado las colmenas en el lugar para que haya un tiempo de

exposición y los contaminantes tengan tiempo de acumulación en los tejidos de las abejas, de esta manera muestrear abejas nacidas dentro del sitio de exposición, se escogen abejas dentro de los 18 y 24 días de nacidas, que son envasadas en dióxido de carbono y en contenedores inertes; según resultados los análisis dieron a conocer la presencia de tres pesticidas, que fueron el Amitraz presente en el sitio de exposición encontrado en las 2 primeras muestras que se tomaron, pero cabe resaltar que este pesticida es utilizado en la apicultura contra la enfermedad varroasis que son ácaros ectoparásitos, por lo que en las dos muestras tomadas pudieron provenir del mismo mantenimiento con este pesticida a las colmenas; Matrina, este pesticida se halló en la segunda toma de muestra en el sitio testigo con un nivel de concentración cercano al límite establecido de cuantificación, este pesticida se da de forma natural en algunas plantas y es muy poco tóxico; el pesticida Atrazina fue hallado en la primera muestra del sitio testigo y es utilizado como herbicida en cultivos de maíz, es cancerígeno y está prohibido su uso desde el año 2017 por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y pesca de Uruguay; los Furanos (PCDF) Dioxinas (PCDD) pertenecen a los hidrocarburos aromáticos halogenados, estos compuestos son emitidos a la atmósfera por actividades antropogénicas como incendios forestales, quema de desechos, metalurgias, reactivación de carbón activado, al igual que los gases que escapan los motores de industrias textiles, industrias de agua y plantas de tratamiento de aguas residuales, en las muestras de abejas se encontraron 17 congéneres tóxicos, los resultados sobre los elementos traza metálicos muestran que no hay una diferencia significativa entre el sitio testigo y el sitio de exposición directa, por lo que no existe contaminación de los mismos en la planta de cemento ETM; en cuanto a las concentraciones de los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) en el sitio de exposición son mucho más

bajas que en el sitio testigo, por lo que se puede concluir que la contaminación del aire no proviene la planta HAP sino de sitios de su alrededor (Laurie, 2019).

La ciudad de Córdoba - España se encuentra en el Valle del río Guadalquivir, allí se realizó un estudio con la abeja *Apis Mellifera* como bioindicadora de la contaminación por metales pesados, para el año 2004 Córdoba fue la segunda ciudad con mayor contaminación atmosférica al punto de llegar a tener un 28% de días la contaminación supera los límites permisibles según el Informe de Medio ambiente. las principales actividades de esta ciudad son agrarias a sus alrededores, industrias que funden metales no féreos y producción de cobre, fábricas de cemento, vertederos, fábricas de cartón y papel; para llevar a cabo esta evaluación utilizaron colonias de abejas para que identificaran los metales pesados y a su vez hallar su utilidad en la gestión ambiental, escogieron cinco estaciones estratégicas de la zona urbana, la estación # 1 se encuentra en la zona oeste de la ciudad en una parcela del Centro de Experimentación Agraria I, la estación # 2 está a 15 kilómetros de la ciudad en la parte sur y es una zona agraria, la estación # 3 está en la sierra morena localizada a 8 km de la ciudad, la estación # 4 fue ubicada en el centro de la ciudad en el monumento de la “Torre de la Malmuerta”, la estación # 5 fue ubicada en una cantera abandonada con vegetación ubicada al este de la ciudad, de estas estaciones los puntos de control fueron la estación 2 y 3, cada estación contiene dos colmenas de abejas para que empezaran a evaluar el nivel, temporalidad y variación de metales como el Pb, Ni, Cr, Cd; duraron tres años (2007, 2009 y 2010) recolectaron muestras de abejas pecoreadoras y su néctar, para un total de 192 muestras que correspondían a 125 abejas, donde 32 fueron muestreadas en mayo, junio, julio y diciembre del 2007, 90 abejas desde abril hasta el mes de diciembre y 70 abejas desde el mes de abril a octubre en el año 2010; en cuanto a las

muestras de néctar cortaron trozos de panal y registraron la humedad del néctar con un refractómetro, siempre y cuando el trozo cumpliera con más del 19% de humedad, se recogieron muestras de todas las estaciones y colmenas cada mes, por lo que al final se recogieron 84 muestras con 10 ml cada una, donde 24 muestras fueron en los meses de mayo, junio y septiembre del 2007. 30 muestras durante todo el año 2009 y otras 30 en el 2010 en los meses de mayo, junio y julio. La concentración de metales en miligramos/kilogramos y néctar se determinó por espectrometría de emisión atómica y absorción atómica en horno de grafito, los resultados evidenciaron grandes diferencias entre abejas y néctar, estaciones y periodos, de tal manera que ofrece información cualitativa muy relevante ya que las abejas y el néctar registraron valores de Pb aceptables en la estación agrícola, también registraron mayores frecuencias de Ni en el néctar y Cr en abejas en la estación industrial en el mes de junio de 2007, las estaciones urbana y forestal tuvieron valores altamente preocupantes en el año 2010 donde la concentración de Cd en néctar y abejas tuvieron valores de frecuencia muy altos, por lo que se denomina la abeja *Apis mellifera* perfecta para incorporarla en sistemas de evaluación y control de la contaminación del aire, ya que ofrece características cuantitativas y cualitativas lo que permite su uso de una manera sencilla para prevenir y conocer alteraciones ambientales, los resultados que se obtienen de abejas de esta especie *Apis Mellifera* arroja información no solamente de la presencia de metales sino de su distribución y evolución que tienen sobre el medio ambiente (Gutiérrez, 2016).

Estudios con plantas



Imagen 6. *Vicia faba*. Elaboración propia.

❖ Estudios Nacionales:

En Colombia el uso de bioindicadores para evaluar la calidad del aire realmente no ha sido un método que se haya aprovechado como debería ser, sin embargo, en el barrio San Fernando en la ciudad de Bogotá se realizó un estudio con plantas *Trifolium pratense* (trébol) y *Vicia Faba* (haba) ya que estas plantas reaccionan de forma visible en su crecimiento, cambios fisiológicos, alteración en la producción de pigmentos fotosintéticos, daño foliar y biomasa, lo que las hace perfectas para evaluar efectos del ozono y SO₂ sobre dos vías con alto tráfico vehicular las 24 horas del día como lo es la calle 68 y la calle 72 con el fin de conocer y evaluar de esta manera la calidad del aire en este barrio, cabe resaltar que este barrio sufre de contaminación atmosférica por la creciente emisión proveniente de fuentes móviles que se concentra en las carreras 30, 50, 86 y las calles 80, 72 y 68, esta contaminación no sólo afecta al barrio san Fernando sino también al barrio

José Joaquín Vargas y Popular modelo, este estudio con la planta bioindicadora *Vicia Faba* se hace teniendo en cuenta bioensayos y metodologías que han aplicado en otros países, en cuanto a *Trifolium pratense* se utilizó por su capacidad para adaptarse a temperaturas medias y bajas en la ciudad de Bogotá, además de su rápido crecimiento y así mismo evaluar si esta planta es sensible a contaminantes atmosféricos, ya que no existen registros de estudios anteriores de esta planta. La metodología se llevó a cabo en 3 fases, en la 1 fase se hizo cultivo de las plantas *Vicia Faba* y *Trifolium pratense* en un sitio con nula contaminación para posteriormente 2 semanas después llevarlas al sitio de exposición, en esta fase también se determinó la calle 68 y 72 con cra 68 como zona con contaminación alta por tráfico vehicular y hay ausencia de árboles, el parque Metrópolis como zona con contaminación moderada con presencia de árboles y otras plantas, y por último una casa de familia como área de menor contaminación, a su alrededor tiene bastantes árboles y edificaciones; en la fase 2 después de 2 semanas de nacidas las plantas se llevan a cada uno de los 3 sitios de contaminación, ubicando 3 plantas de cada especie, por un periodo de 10 semanas y con observación cada 3, en la fase 3 realizaron un estudio sobre el comportamiento de las plantas para establecer el grado de contaminación vs el vigor de las plantas; los resultados en la zona de alta contaminación fueron nefastos, puesto que las plantas no resistieron más de 6 semanas a la alta exposición de contaminación, se marchitaron, hubo presencia de clorosis, necrosis y finalmente murieron las 2 especies de estudio, se confirma que la combustión de fuentes móviles son la causa de la contaminación presente en esta zona, en la zona de contaminación intermedia la especie *Vicia Faba* durante la semana 7 empezó a mostrar alteraciones de contaminación como afectación en sus crecimiento, marchitamiento y necrosis, para finalmente desaparecer, la

especie *Trifolium pratense* hasta la 5 semana presentó normalidad pero transcurrido este tiempo desapareció rápidamente casi el total de población. En la casa de familia situado como el punto de contaminación baja se observó un crecimiento normal de las 2 especies de plantas hasta el final del estudio (10 semanas) sin sufrir ningún tipo de alteración, indicando de esta manera que este ambiente es realmente bajo en contaminación y posee una buena calidad del aire saludable para las personas que habitan allí. Esto se debe a la ausencia de tráfico vehicular y la zona arbórea que tiene a su alrededor que funciona como barrera protectora, por otra parte también se concluye que en las zonas de contaminación el tiempo es un factor que determina la permanencia de las plantas a excepción de otros factores externos que se pueden presentar, la especie *Vicia Faba* fue más tolerante comparado con *Trifolium* puesto que esta última presentó mayor sensibilidad donde se pudo notar en la zona alta y media de contaminación, el aire en el barrio San Fernando se encuentra con altas concentraciones de contaminación por gases emitidos de fuentes móviles teniendo en cuenta que estos son los que tienen alta frecuencia en el sector por contener vías principales de la ciudad (Cortés & Calderón, 2015).

❖ Estudios extranjeros:

En las ciudades La Paz y El Alto en Bolivia cuentan con 2 estaciones climáticas durante el año, que es una época seca en invierno y una época húmeda en verano, las dos ciudades cuentan con parque automotor con más de 128.000 vehículos en el año, por lo que la fuente de contaminación son el tráfico vehicular a pesar de que hay pequeñas industrias y talleres pero su contaminación es baja, el Instituto de Ecología es el primero en

implementar bioindicadores para evaluar la calidad del aire en estas dos ciudades; en la metodología emplearon 2 tipos de monitoreo, el biomonitoreo pasivo donde implementaron hojas de árbol ornamental de la especie *Acacia melanoxylon* y de un arbusto de la especie *Hedera hélix*, teniendo en cuenta las ciudades cuentan con gran distribución de estas especies en todas las zonas, que sus hojas tengan facilidad para medir, hojas lisas y resistentes para así evaluar el material particulado por medio del polvo depositado en las hojas, también evaluaron la acumulación de metales pesados en otro árbol ornamental de la especie *Populus balsamifera* y la realización de cartografía de líquenes junto con el IPA evaluando la cantidad de líquenes en árboles ornamentales y analizando la ausencia o presencia de especies sensibles y tolerantes. Ya como biomonitoreo activo se evaluó la influencia que tuvo la calidad del aire sobre estas tres especies de líquenes *Hypotrachina Physcioides*, *Usnea subfloridana* y *Stereocaulon ramulosum*, por otra parte, también evaluaron la feofitinización y acumulación de metales en la poácea (planta) de especie *Lolium multiflorum* por su efecto de reacción ocasionada por contaminantes gaseosos que degradaron su clorofila y acumulación de Cd y Pb en sus hojas expuesta durante 28 días. El biomonitoreo tanto en la ciudad de la Paz y El Alto se presentaron algunas dificultades por escasez de áreas verdes, sin embargo se llevó a cabo el estudio con la vegetación arbustiva y arbórea de la zona, los líquenes sobre la corteza de los árboles dio respuesta a factores como contaminantes dispersos con la brisa del viento, contaminación por el tráfico vehicular y las pequeñas fuentes de emisión. Por otro lado, confirmaron que *Lolium multiflorum* es una especie excelente para medir la acumulación de flúor y metales pesados, siendo una especie que ha sido recomendada a nivel mundial (Anze et al., 2007).

Las ciudades son un foco de impactos ambientales y estos impactos normalmente son evaluados por métodos tradicionales ya establecidos internacionalmente y que pueden generar un buen costo, también está la alternativa de los bioindicadores, esto teniendo en cuenta que los seres vivos son directamente afectados si en su lugar de residencia existe contaminación y está sigue aumentando, por lo que nos brinda una mejor visibilidad de los efectos que traen en un ser vivo, En la ciudad de Tarija – Bolivia se empleó la planta de especie *Vicia faba* (haba) y *Raphanus sativus* (rábano) como bioindicadores. Siendo una herramienta fundamental para estudiar los inicios de contaminación en esta ciudad, teniendo en cuenta que las alteraciones ambientales precisamente se pueden observar en aquellos seres sensibles a la contaminación y de esta manera llevar a cabo una comparación entre las plantas bioindicadoras y los datos obtenidos previamente por medio de métodos físico químicos en la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (MoniCA) donde hicieron monitoreo con O₃ y NO₂, la calidad del aire en la ciudad de Tarija es relativamente buena, sin embargo los muestreos tradicionales sólo los han realizado en la capital del departamento pero con grandes sumas económicas, así que en esta ciudad decidieron hacer un monitoreo pero con un método alternativo al tradicional y aplicable en la comunidad; las semillas de haba y rábano fueron sembradas en macetas plásticas fuera de la ciudad y una vez germinaron los ubicaron en los mismos 7 puntos que utilizaron en la Red MoniCA, los resultados arrojaron que el rábano fue el más afectado presentando alteraciones en su progreso de hojas y tamaño justo en sitios donde hay congestión vehicular y cuanto a las habas también existe diferencia en cuanto a la cantidad de hojas y peso húmedo de la planta, en cambio los rábanos obtuvieron su máximo crecimiento en los sitios con menor contaminación de NO₂ y comparado con los datos registrados en la Red

MoniCA no coinciden según los efectos en las plantas, ya que por ejemplo en el punto de mayor concentración registrado no concuerda con el punto de menor desarrollo de las especies, por el contrario algunas se han desarrollado muy bien y otras si muy poco, sin embargo se concluye que debido a la falta de estudios de la calidad del aire desde el último monitoreo por la Red MoniCA puede haberse presentado variaciones en la contaminación en los diversos puntos de muestreo (Oller, 2017).

La industria de Cubatao, Brasil es una de las industrias más importantes de América del sur como siderurgias, refinería, plantas químicas, pero la piscina industrial central está en el pie de la montaña costera de la Sierra do Mar y viene afectando la selva tropical Atlántico de la región de la Sierra de mar que cuenta con diversidad de especies pero que están siendo amenazados por la presencia de contaminación, más aun dado que el viento contribuye en llevarse a su favor y extender la contaminación acumulándola en los valles más estrechos, esta contaminación atmosférica genera daños en la vegetación y el suelo eco sistémico, por ejemplo los árboles presentan lesiones, otra parte ya alcanza una alta tasa de pérdida arbórea, reduciendo de esta manera la diversidad de especies pero para confirmar sospechas de quién generaba la contaminación realizaron un estudio con plantas bioindicadoras que las expusieron a diversas distancias de la industria, donde en la primera fase buscaron el área de exposición pertinente y acumulación para saber si son adecuadas para usarlas en el bosque tropical de atlántica, escogieron semillas de *Nicotianay Urtica* y la propagación de semillas fue realizada en un área verde del Instituto de Botánica Sao Paulo, junto con *Petunia hybrida cv* sensible a compuestos orgánicos de smog fotoquímico como los aldehídos e hidrocarburos, *Amistad blanca* y *Gladiolo cv* sensibles al Fluoruro de hidrógeno (HF), *Lolium multiflorum italieum* acumulador de elementos tóxicos, los

híbridos de *hemerocalis* también fueron incluidos para probar su potencial bioindicador de fluoruro; en la segunda fase desarrollaron experimentos con plantas nativas y escogieron la planta bioindicadora con mayor influencia en el ecosistema, comprobaron si las plantas bioindicadoras tenían factores de sensibilidad expuestas por 1 día, donde evaluaron los efectos sobre las plantas, por medio de los síntomas y análisis químicos de las hojas; allí los resultados arrojaron la presencia de oxidantes fotoquímicos tóxicos en las áreas anchas de la zona investigada, donde hubo daño más que todo por flúor, la *Nicotianay* y *petunia* se le dañó las hojas del tallo principal, en la *Urtica* hubieron lesiones en 10 hojas del tallo principal, las plantas bioindicadoras que se expusieron en la zona de investigación mostraron lesiones similares a las de fumigación por Nitrato de peroxiacilo (PAN). En los *Gladiolos* las lesiones empezaban clorosas junto con un color verde opaco y quemado en las puntas hacia la base de cada hoja, esto se presentaba en hojas nuevas y tiernas, mientras que en las hojas viejas si no. Además encontraron daños en la meseta Paranapiacaba, en el Valle de Pil6s y en el Valle de Mogi por contaminación atmosférica, por contaminantes primarios como Óxidos de nitrógeno, partículas, hidrógeno y fluoruro, en cuanto al ozono la contaminación si mostró ser débil, en cuanto a las concentraciones altas de hidrocarburos y aldehídos pueden ser ocasionadas por las industrias petroquímicas de Cubatao (Klumpp *et al.*, 1993).

A partir del año 2006 el Instituto de ecología de Bolivia da a conocer plantas bioindicadoras que han venido implementando en diversos puntos de la ciudad de La Paz, son especies estandarizadas a nivel mundial pero nativas de Bolivia y cultivadas en las diversas regiones del mismo país, está *Lolium multiflorum* acumuladora de metales pesados, *Raphanus sativus* donde se observa los efectos de la contaminación del aire, *Vicia*

Faba evalúa los efectos de ozono y *Tradescantia cerinthoides*, *Tradescantia pallida* ssp. *Purpurea* evalúan efectos genotóxicos. Sin embargo, la más recomendable por su gran resistencia a las plagas y a bajas temperaturas, su acelerado crecimiento y su bajo costo para analizar los efectos de contaminación atmosférica durante toda la época del año es *vicia faba*, siendo esta una especie recomendada a nivel mundial, la única desventaja es que es muy sensible ante la presencia y ataque del hongo fitoparásito *Botrytis fabae* ya que le causa daños en sus hojas y tallos muy similar a los efectos del O₃ (Anze *et al.*, 2007).

Estudios con musgos



Figura 7. Musgos. Elaboración propia.

❖ Estudios Nacionales:

Al oeste de la sierra nevada del Cocuy ubicada en Boyacá, Colombia trazaron un transecto desde el monte mahona que queda a 4200 metros sobre el nivel del mar (msnm) siendo este el punto más alto hasta la parte sur del cañón en el río Chicamocha que queda a 1200 msnm, donde hicieron parcelas por cada 200 metros de altitud para un total de 16 puntos para recolectar muestras de musgos en árboles, piedras y suelo, donde se encontraron 80 especies con 29 familias y las más diversas fueron la familia Pottiaceae con 15 especies y Brachytheciaceae con 10 especies, donde los resultados arrojaron que a mayor altitud la cobertura de musgos incrementa. Por ejemplo en caso de los páramos y superpáramos fueron las condiciones más óptimas para el crecimiento de estas briofitas, los musgos presentes en altitud media se muestran más transicionales, en otras ocasiones dependiendo de los ecosistemas se muestran más enfocados a ciertos sustratos, como es el caso del superpáramo se enfoca en especies rupícolas y el bosque alto andino enfocado al sustrato de especies epífitas, cabe resaltar que en este estudio se registraron 36 nuevos registros para Boyacá y 8 para Colombia (*Grimmia donniana* Sm, *Grimmia elongata* Kaulf, *Grimmia fuscolutea* Hook, *Hedwigia ciliata* (Hedw.) P, *Hedwigidium integrifolium* (P. Beauv.) Dixon, *Streptocalypta lorentziana*, *Syntrichia lacerifolia* y *Syntrichia laevipila* Brid; también se encontraron 5 cinturones altitudinales y especies que representan a cada uno de ellos, están los superpáramos con las siguientes especies que los representan *Grimmia elongata*, *Andreae rupestris*, *Leptodontium synthrichioides*, *Lepyrodon tomentosum*, *Leptodontium flexifolium*, *Macromitrium punctatum* y *Racomitrium crispipilum*; están los páramos con especies como *Cryphaea ramosa*, *Grimmia fuscolutea*, *Syntrichia Laevipila*, *Anomobryum postratum* y *Hedwigia ciliata*; subpáramo con especies que lo representan *Leptodontium viticulosoides*, *Pleurochaete squarrosa*,

Syntherichia lacerifolia, *Fissidens weirii*; bosque alto andino con especies como *Groutiella chimborazensis*, *Brachythecium rutabulum*, *Brachymenium klotzchii*, *Chryso-hypnum elegantulum* y *Erythrodonium longisetum*; y está el Bosque montano bajo con especies como *Erpodium beccari*, *Pseudocrossidium replicatum* y *Fabronia ciliaris* (Mejía & Castro, 2018).

❖ Estudios extranjeros:

(Vukovi *et al.*, 2014) en su estudio de musgos como bioindicadores de la calidad del aire encontró concentraciones de Pb, Ni, Fe, Cr, Co, Al y Ba, demostrando de esta manera que el musgo es un bioindicador efectivo para monitorear biomagnéticamente en sitios con tráfico vehicular. Es decir en áreas urbanas e industriales; del género *Sphagnum* todas sus especies son recomendadas las más indicadas para monitoreos de la calidad del aire debido a sus características fisicoquímicas: sus filoides (hojas) están compuestas de aproximadamente 2/3 de biomasa seca y tienen una zona gigante que atrapan partículas del aire.

Los musgos ya han sido probados como bioindicadores de la calidad del aire y han demostrado su utilidad, por medio de biomonitoreo y pasivo, por tal razón en este estudio proponen una alternativa para no extraer el musgo nativo hacia los puntos escogidos de monitoreo, en la zona Metropolitana del valle de Toluca donde ya se han hecho estudios con musgos donde las especies *Leskea angustata* y *Fabronia ciliaris* son bioindicadoras de metales pesados, también fueron las especies más abundantes en esta zona metropolitana, por tal razón en el presente estudio que se llevó a cabo en el Municipio de Ocoyoacac, Estado de México y dentro del área del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares,

recolectaron musgos de especies *Leskea angustata* y *Fabronia ciliaris* siendo las más abundantes, teniendo en cuenta el estudio de la zona Metropolitana, escogieron los musgos que tuvieran la presencia de esporofitos y los cultivaron junto con la especie modelo *Physcomitrella patens*, utilizando el método *in vitro*. Lo que quiere decir que se cultivan dentro de un vidrio (tubo de ensayo), el cultivo lo realizaron a partir de las esporas y a partir de tejido, donde observaron sus cualidades a medida que fue creciendo, donde como resultado de este cultivo es obtener musgo libre de contaminación para exponerlo en la zona contaminada en la que se va a monitorear y de esta manera evaluar los valores de contaminación con el tiempo que se deje expuesto el musgo, sin embargo en este estudio sólo se realizó el cultivo en laboratorio donde los resultados del cultivo realizado a partir de las esporas fue exitoso con las especies *Physcomitrella patens* y *Fabronia Ciliaris*, donde casi todas las esporas germinaron y crecieron, en cuanto las especies de *Leskea angustata* sí germinaron pero no crecieron, algunas por presencia de contaminación. El cultivo a partir de tejido, la especie *Fabronia Ciliaris* creció más rápidamente en el sustrato de Jiffy que sobre el medio BCD, sin embargo su crecimiento es más lento que el crecimiento de *Physcomitrella patens*, para concluir el cultivo por medio de tejido crece más rápido que con esporas, lo cual es muy recomendable (García *et al.*, 2016)

La actividad humana normalmente genera alteración y pérdida en los hábitats naturales, en México dentro del grupo de las briofitas, los musgos son los más abundantes con 984 especies y diversidad, datos registrados durante más de 40 años, realmente la información de musgos en zonas urbanas es escasa, debido a los pocos estudios realizados; a excepción de la zona Metropolitana que si es estudiada donde han encontrado 87 variedades y especies de musgos, sin embargo debido a la amplia contaminación existente

por ser el foco de actividades económicas en el Estado de México y así mismo, en esta zona se ha notado la disminución de su frecuencia y número de especies, de aquí la necesidad de buscar estrategias que aporten con información para implementar programas de monitoreo y evaluación. Teniendo en cuenta el anterior problema ambiental planteado se estudió la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), donde se seleccionaron 16 zonas verdes donde 8 son parques urbanos con cantidad de árboles y las otras 8 zonas son sitios rurales con vegetación natural, de allí se cogieron las muestras de musgos epifitos y se evaluaron 10 árboles de las especies más abundantes de cada zona por el método de muestreo en parcela en tres diferentes niveles del tronco desde los 50 cm hasta los 2 metros, la diversidad de musgos fue calculada por medio de los índices de diversidad de Shannon; los resultados arrojaron 39 especies, donde la familia más diversa fue Pottiaceae 17 – 50%, enseguida la familia Bryaceae con un 10 - 40%, y la especie más abundante *S. amphidiacea* en 8 zonas verdes, la especie *B. argeteum* demostró tolerar ambientes perturbados por la contaminación, en el caso de la familia Pottiaceae que fue la más diversa, es la más común en todo el mundo y presenta el mayor número de especies con la capacidad de crecer en diferentes hábitats, generalmente alterados o ambientalmente con condiciones extremas. Según los resultados, las áreas verdes dentro de la ciudad de Toluca presentan disminución de diversidad y abundancia de musgos, esto debido a que esta ciudad alberga bastante población de la Zona Metropolitana viene presentando menor cobertura vegetal y mala calidad del aire (Zepeda *et al.*, 2014).

En la ciudad de Quito – Ecuador se estudió la concentración de metales pesados como el Cd y Pl utilizando musgos como bioindicadores para evaluar la calidad del aire, en ciertos puntos de la ciudad distribuidos a lo ancho y largo, se tuvo en cuenta briofitas como

los musgos ya que estos no cuentan con pared celular lo que les permite absorber los contaminantes atmosféricos, recolectaron el musgo en un área silvestre llamada el Molinuco, donde tomaron 50 muestras del género *Rhaphidorrhynchium*, teniendo en cuenta que es una zona natural con escasa o nula contaminación para transportado para plantarlos en árboles con su corteza original y con ayuda de cinta, en los 20 puntos de biomonitoreo establecidos en la ciudad y zonas aledañas, como avenidas y parques donde permanecieron por 50 días para luego llevarlas al laboratorio. Allí las muestras se dejaron secar al aire libre para ser trituradas y hacer el análisis respectivo, se hallaron concentraciones de contaminantes por medio del método de absorción atómica, donde los resultados indicaron la presencia de Pl en todos los puntos establecidos y analizados, mientras que el Cd sólo fue hallado en el punto cercano al intercambiador de Zámiza; para cuantificar la deposición metálica del Cd y Pb de las muestras de musgo, utilizaron la técnica analítica de espectroscopia de absorción atómica, donde se pudo conocer que en el ambiente de la ciudad existe concentración de Pb proveniente muy seguramente de las industrias o debido a un mal manejo de residuos. Ya que en la gasolina hace años eliminaron este metal, lo grave del Pb es que permanece en el ambiente aproximadamente 20 años y puede que aun quede residuos en el ambiente de los años en que si se utilizaba el Pb en el combustible, por otra parte, el Cd es un metal peligroso y muy contaminante que fue hallado en el punto que queda cerca de un basurero, eso indica que tienen arrojado pigmentos de plásticos electrónicos que al ser incinerado queda este metal contaminante en el ambiente; a pesar de que el estudio fue por poco tiempo se pudieron obtener buenos resultados haciendo uso de los musgos como bioindicadores, pero es de vital importancia seguir monitoreando la calidad del aire en la ciudad de Quitó ya que presenta una

importante concentración de contaminación por metales muy peligrosos, que no sólo perjudica el ambiente sino la salud de toda la población (Noriega *et al.*, 2008).

En Venezuela evaluaron las especies *Tortella humilis*, *Pottiaceae* y *tortula* sp en el Topo Itagua que es un relieve boscoso no intervenido por el hombre ubicado detrás de la Universidad Católica Andrés Bello, teniendo en cuenta que esta universidad está rodeada de zona residencial e industrial, al norte está el sector popular de Carapita, al oeste se encuentra la zona residencial e industrial, al este la zona industrial llamada La Yaguara y al sur el Topo de Itagua que es dónde se llevó a cabo el estudio por medio de la técnica de monitoreo pasivo para analizar concentraciones de Pb, Cu, Zn, Hg, Cd y Fe, la recolección de las muestras de briofitas se hicieron en árboles, rocas y suelos. Ubicaron las estaciones de muestreo a 700 metros del centro urbano, de las industrias y de carreteras principales, las muestras de las briofitas o musgos fueron tomadas en áreas de 50 por 50 cm para un total de 5 muestras para analizar y para las muestras de suelo se tomaron también 5 a una profundidad máxima de 5 cm, los musgos encontrados en estas laderas del Topo de Itagua eran totalmente visibles en la superficie del suelo. La especie más abundante fue la de la familia Pottiaceae y generalmente estas especies son típicas de suelos abiertos en bosques (terricolas) o rocas (saxícolas) por la forma de vida cespitosa que tienen y hábito acrocárpico, en la muestra vegetal el Cd tuvo mayor acumulación mientras que el Zn presentó niveles menores, esto indica que la concentración natural de los metales pesados puede ser extensa, sin embargo, puede ser ayudada en gran proporción por actividades antropogénicas que contaminan como: las industrias, desechos de incineraciones, polvo de suelo, combustión de carros, construcciones, fundidoras de acero que entre todas arrojan Fe, S, Cd, Zn y Pb., el Cadmio según los resultados indica un enriquecimiento de 126,3

por fuentes antropogénicas señalando las diferentes fuentes industriales y la combustión de automotores. El Hierro se encontró en una categoría inferior a 10 indicando su presencia de manera natural, sin embargo el Fe también proviene del polvo y partículas del suelo transportados por el aire, además de las industrias del acero y hierro; las diferencias en la adsorción de metales entre cada una de las especies de musgos depende de cada sitio de intercambio, como también por las diferencias físicas de cada especie para acumular metales, por ejemplo, *Tortella humilis* tiene forma de cespitosa lo que facilita que el contaminante se aferre a sus tejidos mientras que *Tortula* sp crece arrastrándose y de forma espigada por lo tanto, no facilita la captación de contaminantes por no estar tan expuesta al viento, cabe resaltar que en el punto de estudio predomina los vientos se lo cual son los responsables de llevar los metales pesados procedentes de las diversas fuentes o focos de contaminación como lo son la autopista Francisco Fajardo, Yaguara, la avenida Teherán y la zona de Antímano. Se concluyó que las especies *Tortula* sp y *Tortella humilis* fueron las más potenciales acumulando Zn y la *Pottiaceae* sp acumularon Cd y Zn; los resultados evidencian que esta población se encuentra expuesta a contaminantes atmosféricos y este resultado contribuye con información para estudios epidemiológicos y así mismo, evaluar riesgos en la zona (Toledo *et al*, 2014).

En la estación Antártida Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado dedicada a la construcción de módulos y a operar, esta estación está situada en la isla Greenwich, se evaluó la contaminación por metales pesados en musgo mediante muestras que se recolectaron a los alrededores de esta estación en el año 2011 en los meses de febrero a marzo, con el fin de evaluar los impactos antropogénicos por la humanidad en esta región, escogieron 5 puntos de muestreo influenciadas o afectadas directa e indirectamente, los

puntos fueron isla torre, punta Figueroa, frente al módulo de generadores, tras el módulo de generadores y frente al módulo de laboratorio, luego se realizó análisis cuantitativo instrumental en laboratorio donde se llevó a cabo cuantificación por espectroscopia de absorción atómica y se determinó que los siguientes metales se encontraban en mayor concentración en las muestras de musgos que fueron recogidas cerca al punto de los generadores eléctricos, As 1.193 $\mu\text{g/g}$, Cd 0.0031 $\mu\text{g/g}$, Pl 0.067 $\mu\text{g/g}$ y Cr 0.013 $\mu\text{g/g}$, el del módulo del laboratorio el Hg fue el de mayor concentración en todos los sitios de muestreo con 9.25 $\mu\text{g/g}$, esto debido a las labores que se llevan a cabo en el sitio y además las partículas de contaminantes que son llevadas por agua y aire que llegan a la Antártida, en el caso de los puntos donde usan pinturas anticorrosivas, soldadura, quema de combustibles fósiles son actividades que ocasionan el incremento de metales pesados en estos sitios; el As fue el segundo metal con mayor concentración ya que es un contaminante fácil de ser transportado por el aire y se acumula en organismos vivos, el Cd si fue el metal con más baja concentración en todos los puntos de muestreo, por otra parte, la especie de musgo que se halló en todos los puntos de muestreo fue *Saniona Uncinata*, y con estos resultados se confirma que el musgo sirve como bioindicador y a la vez como biomonitor para hallar y evaluar metales pesados presentes en el aire de la Antártida (Sarmiento, 2013).

Estudios con clavel de aire



Imagen 8. Clavel de aire. Elaboración propia.

❖ Estudios Nacionales:

En el año 2017 se estudió el aire en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, este valle corresponde a 10 Municipios pero el sitio con mayor población es la ciudad de Medellín debido a los altos niveles registrados de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), donde el 59% de $PM_{2.5}$ correspondió al tráfico vehicular y el 34% a fuentes industriales, dado esto, se llevó a cabo la metodología con parámetros magnéticos y haciendo uso de la plata bioindicadora *Tillandsia recurvata* debido a sus abundancia en todo el valle excepto en áreas que estén por encima de los 200 msnm donde presenta escasez y ausencia; el clavel de aire acumula contaminantes en sus hojas escamosas y estos se van resguardando en el centro de la planta ya que sus hojas crecen esféricamente, de esta manera no permiten la salida de contaminantes; se recolectaron 185 muestras de plantas entre 10 y 15 cm de diámetro a una altura del árbol mínima de 1,5 metros con el fin de evitar partículas

suspendidas del suelo, se llevó a cabo en el mes de septiembre de 2016, dividieron el Área Metropolitana en 50 cuadros cada uno con 6 km², donde se tomaron muestras de claveles presentes en sitios residenciales, industriales y vehiculares, también tomaron otras 3 muestras en un bosque a las afueras de la ciudad con mínima contaminación con el fin de obtener un valor de línea base, en 51 muestras se encontraron concentraciones de Pb, Fe, Ba, Sb, Mo, Zn, Cu, Ni, Co, Cr y V; los resultados dieron a conocer que justo en el fondo del valle donde hay presencia de actividades industriales, humanas y un alto tráfico vehicular se hallaron las concentraciones más altas de material particulado con valores medios de 100,8 y 93,5 × 10⁻⁸ m³kg⁻¹, mientras que los valores más bajos fueron registrados en zonas residenciales con valores medios de 27,3 × 10⁻⁸ m³kg⁻¹, en todos los sitios se encontraron partículas de hierro donde su presencia, cantidad y sobre todo tamaño estuvieron en el siguiente orden descendente, zona industrial, especialmente por fabricas metalúrgicas, zona vehicular y zona residencial, la mayoría de partículas registradas tienen un tamaño entre 0,2 y 5 μm lo cual perfectamente pueden ser respirables y tóxicas para la salud de la ciudadanía, donde se concluyó que este método de biomonitorio magnético es eficaz para identificar zonas contaminadas con partículas producto de bifenilos policlorados (PCB), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), quema de combustibles fósiles, etc., en la Zona Metropolitana del Valle de Aburrá (Mejía *et al.*, 2018).

❖ **Estudios extranjeros:**

Las plantas responden de diversas maneras a contaminantes externos presentes en la atmósfera, esto debido a la sensibilidad, como es el caso de las *Tillandsias* que se caracterizan por su abundancia y persistencia en sitios agresivos a la contaminación, estas plantas están demostradas que son bioindicadoras de la contaminación por metales pesados y en el presente estudio evaluaron su aplicación para hallar concentraciones de hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), basados en estudios realizados anteriormente; las especies *Tillandsia* son epífitas al igual que los líquenes que crecen sobre otras plantas sin ser maleza para estas, y otras son litofitas que crecen en piedras, techos, etc., estas plantas se nutren por medio de sus hojas cubiertas de células tricomas que tienen la función de absorber agua y nutrientes presentes en el aire, ya que sus raíces sólo cumplen la función de soporte sobre el árbol o roca que se encuentre, las especies más utilizadas como bioindicadoras son *Tillandsia capillaris* y *Tillandsia usnoideas* que es una planta herbácea con lasos ramificados colgantes que pueden alcanzar los 8 metros de longitud, en la ciudad de Stuttgart, Alemania evaluaron la acumulación de (PAHs) con las especies *T. Capillaris* y *Lolium multiflorum*, en sitios urbanos y rurales clasificados de acuerdo a la cantidad de tráfico vehicular, donde se determinaron concentraciones de 16 contaminantes foliares de PAHs y otros contaminantes como Co, Br, Fe, Cu, Pb, Zn y Mn, la correlación de Pearson entre los hidrocarburos y el PM₁₀ indicaron que *Tillandsia capillaris* es eficaz acumulando partículas de compuestos contaminantes y es considerada como bioindicadora apropiada para partículas, en cuanto a los análisis de varianza sobre las concentraciones de PM₁₀ en las estaciones de monitoreo y PAHs que fueron medidas por *T. Capillaris*, las mayores concentraciones corresponden a las zonas con alto tráfico

vehicular, siendo esta la causa que origina la concentración de partículas y de PAHs en el aire de esta ciudad (Cuadrado, 2011).

En la ciudad de Santa Fé – Argentina se estudiaron los claveles como bioindicadores de la calidad del aire, previamente en este país ya han hecho estudios utilizando claveles para evaluar la calidad del aire, sin embargo, en la ciudad de Santa Fé nunca se han utilizado claveles por lo que en esta ocasión será la primera vez con el fin de evaluar la presencia de metales pesados en el aire de esta ciudad y así mismo, ver su potencial como bioindicadores para evaluar y monitorear la calidad del aire. Para el muestreo escogieron 3 espacios en zonas verdes de pleno centro de la ciudad correspondientes a la plaza del soldado (PS), plaza Eva Perón (PF) y plaza San Martín (PB) además de otros dos espacios VLR Y C como puntos de control en zonas suburbanas, cabe resaltar que todos estos sitios tienen un elevado flujo vehicular, se tomaron muestras de claveles de aire presentes en árboles pertenecientes a la especie *Tillandsia recurvata* a una altura entre 1,5 y 2 metros del suelo, para un total de 11 muestras, estas muestras fueron analizadas por absorción atómica en un espectrofotómetro para cuantificar metales donde hallaron Zn, Mn y Fe. En todos los sitios la concentración de metales pesados fueron mayores en el centro de la ciudad que en las zonas suburbanas debido a la concentración significativa de flujos vehiculares, la alta concentración de Fe tienen que ver con áreas industriales y urbanas que contribuyen con material particulado, en cuanto a la alta concentración de Mn se atribuye a zonas agrícolas y las altas concentraciones de Zn en los claveles de esta ciudad es por el alto flujo vehicular, además de sitios industriales y agrícolas. Pero en general la causa principal de emisión de contaminantes atmosféricos es la combustión de fuentes móviles, en la zona suburbana donde se localizaba los dos puntos

de control. La concentración de Zn fue menor comparado con la zona urbana aunque la diferencia no es realmente significativa, en cuanto a la concentración más alta de Fe en la zona urbana alcanzó los 2500 $\mu\text{g/g}$ mientras que en el sitio de control fue de 100 $\mu\text{g/g}$, finalmente el clavel resultó ser útil para bioindicar y monitorear la calidad del aire de la zona urbana de la ciudad ya que los metales pesados a tan altas concentraciones pueden ser perjudiciales para la salud, por lo que resulta de vital importancia monitorear constantemente la calidad del aire en la urbanización de Santa Fé debido a su alto tráfico de vehículos que causan contaminación atmosférica (Ghirardi *et al.*, 2010).

En Buenos aires Argentina el gobierno quiso medir el grado de contaminación del aire en las localidades de Beriso y Ensenada por ser zonas industriales, haciendo uso del clavel de aire como bioindicador de contaminación atmosférica, establecieron 16 puntos de muestreo estratégicos en esas zonas, los claveles son sensibles al material particulado PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, se sometieron a técnicas de activación que identifican la evolución de contaminantes del aire, los resultados emitieron baja contaminación en la provincia y resultaron ser potenciales para ser utilizados como bioindicadores en próximos estudios (Infobae, 2006).

Estudios con aves



Imagen 9. Aves. Elaboración propia.

❖ Estudios Nacionales:

En la ciudad de Bogotá se estudió el valor que tienen las aves urbanas como bioindicadoras ambientales por su distribución, lugares en los que se observan y de árboles que se alimentan, en la sabana se encuentran registradas 200 especies, también se ven en el parque Simón Bolívar y el jardín Botánico buscando árboles que les propicie alimento y poder tener un hábitat más o menos tranquilo, 2 fuentes de respiro en medio de una ciudad tan contaminada como lo es Bogotá, a pesar de todo estos dos ambientes urbanos desarrollan una importante función conservando la biodiversidad de aves propias del sitio y de especies que vienen de la sabana. En Bogotá el mayor inconveniente que presenta las aves es la escases de árboles que les ofrezca alimento y esto es un inconveniente que se ha venido presentando debido a la siembra de árboles ornamentales y no nativos, mientras que estos últimos si ofrecen frutos, semillas, néctar, polen e insectos. En Bogotá han sido

registradas 72 especies donde 60 viven en árboles y las otras 10 son aves acuáticas que viven en lagos y humedales, entre las especies más urbanas encontradas en todas las localidades de la ciudad está la especie *Turdus fuscater* o mirla, *Zonotrichia capensis* o Copetón, *Zenaida auriculata* o torcaza y con menor frecuencia el *Colibri coruscans*, en los parques como el Simón Bolívar y Jardín Botánico que tienen bastantes árboles se encuentran especies como *Carduelis psaltria*, *Sicalis luteola bogotensis*, *Tbraupis episcopus*, *Tbraupis episcopus*, *Tyranus melancholicus* y *Tbraupis palmarum*, otras aves acuáticas como garzas *Bubulcus ibis*, *Casmerodius alba*, *Butorides striatus*, patos como *Podilymbus podiceps* y *podiceps dominicus*, otras aves como *Popbirio marlinia*, *Gallinula cbloropus*, *Rallus semiplumbeus*, *Gallinula melanops*, *Angelaius icterocephalus*, *forpus conspicillatus* contribuyen en el mejoramiento de la buena calidad del medio ambiente ya que las aves crean barreras a nivel auditivo, visual y físico contra los olores que trae el aire. Además retienen partículas y contaminantes de la atmósfera, también son reguladores climáticos, todo esto junto a la presencia de árboles en la ciudad dado que sin ellos no habrían aves, juntos regulan y transforman la calidad del aire, entonces si las aves regresan significa que hay un ambiente habitable y medidamente sano para los seres vivos, finalmente se presentan algunas recomendaciones que permiten que las aves retornen a zonas urbanas y así mismo con ellos devolver la calidad medio ambiental (Osorio & Molina, 2009).

❖ Estudios extranjeros:

En la paz Bolivia, se llevó a cabo un estudio donde tuvieron en cuenta aves como bioindicadores de la calidad del aire, escogieron las aves con especies que cumplieran ciertas características en el hábitat de estudio, además de que cada especie responde de manera diferente a las alteraciones ambientales y la ausencia o presencia da a conocer alguna condición ecológica. Por lo tanto, después de la evaluación cada especie fue clasificada teniendo en cuenta la respuesta ante los cambios a diferentes sitios de urbanización y de esta manera definir un programa de monitoreo ambiental en esta ciudad, cabe mencionar que la vegetación de esta ciudad es muy degradada como consecuencia de actividades antropogénicas, dentro de la distribución de categorías dentro de la ciudad se encontraron especies ubicuas, es decir son aves nativas de áreas con urbanización y tienen presencia en todas las categorías o sitios de la ciudad, algunas de estas especies son *Sicalis olivascens*, *Troglodytes aedon*, *Colibri coruscans*, *Catamenia analis*, etc. Otras especies que se restringen moderadamente a ambientes con menor urbanización como residencias algunas de estas son *Colaptes rupicola*, *Patagona gigas*, *Turdus fuscater*, *Anairestes parulus*, etc y sitios de comercio con jardines y otras que se restringen totalmente a ambientes bajos en urbanización como zonas agrícolas, sitios con pocas viviendas, algunas de las tantas especies son *Leptastheburia aegithaloides*, *Phrygilus fruticeti*, *Muscisaxicola griseus*; los resultados arrojaron que la diversidad de aves en la ciudad la Paz refleja las consecuencias de las alteración ambiental en esta ciudad y una de las cosas por las que debe empezar esta ciudad es plantar especies de plantas nativas, ya que gran mayoría de las que existen son exóticas (Villegas & Garitano, 2008).

La contaminación ambiental es una problemática de salud pública, debido a la creciente emisión de contaminantes a la atmósfera, entre los más frecuentes los metales

pesados que producen enfermedades cardíacas, respiratorias, cáncer, problemas con el embarazo, etc., el Pl, Cd y Arsénico (As) , son altamente tóxicos y no son biodegradables por lo que se mantienen y acumulan en el medio ambiente, traspasando todos los niveles de la cadena trófica de todos los ecosistemas, por tal razón, es que las aves silvestres han sido evaluadas en varias ocasiones como bioindicadoras de la contaminación ambiental y de metales pesados, debido a que estas aves se distribuyen ampliamente, tienen un periodo de vida largo y habitan los distintos niveles tróficos de los ecosistemas, convirtiéndose en seres muy sensibles a los cambios y alteraciones atmosféricas, lo que los convierte en bioindicadores de la calidad ambiental el aire y de esta manera monitorean la calidad del hábitat en el que viven, ya que las aves se ven afectadas negativamente en su sistema inmune, sistema endocrino, por la toxicidad de los metales pesados, además de provocar un comportamiento agresivo, disminución en su peso corporal y causar disfunciones en su reproducción; es importante resaltar que hay metales esenciales como el Zn y Cu que contribuyen positivamente en el organismo, como lo es la formación de plumas y el desarrollo de los huevos y metales no esenciales como el Pb, Cd y As que contribuyen negativamente por ser contaminantes. Un estudio realizado En el sur de Italia en un gorrion de la especie *Passer domesticus italiae* evaluaron la concentración de metales pesados por medio de la técnica de polarografía de redisolución en riñón e hígado, teniendo en cuenta un zona rural y zona urbana industrial, donde encontraron mayor concentración de metales pesados en el hígado de gorriones de la zona urbana que los de la rural, el cobre si se encontró en mayor concentración en los de la zona rural y en los riñones de los gorriones urbanos encontraron mayor concentración de Cd, Cu y Pl que en el hígado; otro caso en Cisjordania estudiaron gorriones de la especie *Passer domesticus* de todas las edades y de

zonas tanto rurales como urbanas, donde midieron concentraciones de Pb, Cu, Cd y Zn por medio de espectrofotometría de emisión atómica, hallaron concentraciones en varios de sus tejidos, que se nombrarán de mayor a menor capacidad para acumular: hígado, estómago, huesos, pulmones, plumas, músculos, contenido del huevo, cerebro, corazón y sus cáscaras de huevos., las aves ingieren los metales a través de su alimento y por inhalación. Esto explica por qué el estómago y los pulmones están dentro de los primeros órganos en que más se acumulan los metales, en este estudio el Pl fue el que presentó mayor concentración en los tejidos, esto indica que el área urbana presenta polución, muy probable por el uso de este metal en la gasolina, el uso de aves como bioindicadores de contaminación atmosférica son confiables para evaluar la salud ambiental de ecosistemas, ya que tienen la capacidad de acumular metales pesados en gran cantidad y a largo plazo. En los estudios pueden haber diferencias de concentración de metales en las diversas especies, géneros o grupos etarios, evaluar la concentración de metales pesados en las plumas de las aves es muy fiable porque refleja la contaminación de un lapso de tiempo largo y lo mejor de todo es que no hay necesidad de sacrificar la ave, además de que la recolección y almacenaje es fácil (Parra, 2014).

En la ciudad de La Paz, Bolivia evaluaron las comunidades de aves y clasificaron las especies teniendo en cuenta su respuesta a sitios urbanos y de esta manera usarlos como bioindicadores ecológicos para programas de monitoreo ambiental, en esta ciudad abunda arbustos nativos de las especies *Psoralea pubescens*, *Dunalia brachyacantha* y *Achyrocline satureoides*, otras son especies exóticas como *Eucalyptus globulus*, *Acacia retinoides*, *Cupressus marocarpa*, *Populus nigra*, *Populus balsamifera* y *Pinus radiata* que son sembradas en jardines, calles y parques de la ciudad. Seleccionaron 104 puntos de

observación que consistía en unas celdillas, a cada área de observación le correspondía tener cerca alguna de las siguientes áreas: un área con vegetación natural rural preferible con mínima o nula vivienda humana, presencia de cultivos, pocas viviendas, pocas edificaciones, viviendas con pocas áreas verdes, comercio, viviendas con poquitos jardines y áreas totalmente edificadas; para contar las aves en cada estación se utilizó el punto de conteo con 50 metros de radio y se registró toda especie de ave que se pudiera observar en un lapso de tiempo de 15 minutos, se realizaron 3 repeticiones por cada estación desde el año 2004 mes de septiembre a febrero de 2005, donde todos los conteos fueron realizados por la misma persona entre horas de 6:30 a 10:30. Una vez obtenidos los datos los criterios que establecieron para clasificar las aves que sirven como bioindicadoras de alteración o disturbios en el ambiente fueron: la distribución altitudinal, restricción en ambientes bajos de 3100 a 3499 msnm y restricción para especies en ambientes altos de 3700 a 4099 msnm y la distribución en categorías de urbanización, que se restringe para sitios con mayor edificación que aplica para la especie *Columba livia*, también escogieron 5 especies rapaces *Falco sparverius*, *Buteo poeclichorous*, *Phalcoboenus megalopterus*, *Falco femoralis* y *Falco peregrinus*, en total escogieron 56 especies nativas que pertenecen a 16 familias, en cuanto a las especies ubicuas que se encuentran en todas las zonas de urbanización y que son nativas sobre todo en sitios con alto grado de urbanización y escasa cobertura vegetal como *Zonotrichia capensis*, *Turdus chiguanco*, *Carduelis atrata*, *Phrygilus punensis*, *Zenaida auriculata*, *Metriopelia ceciliae*, *Colibri coruscans*, *Sicalis Olivascens* y *Troglodytes aedon*; las especies restringidas a ambientes con menos urbanización fueron *Anairetes parulus*, *Amazilia chionogaster*, *Colaptes rupicola*, *Sicalis Olivascens*, *Metriopelia ceciliae*, *Catamenia analis*, *Carduelis Xanthogastra*, *Colibri*

coruscans, *Saltador aurantirostris*, *Patagioenas maculosa*, *Diglossa carbonaria* con restricción a ambientes bajos (*Carduelis uropygialis*, *Thraupis sayaca*, *Thraupis bonariensis*, *Pygochelidon*, *Psilopsiagon*) y en cuanto a las especies restringidas a ambientes de menor urbanización fueron *Leptasthenura aegithaloides*, *Asthenes dorbignyi*, *Ochthoeca oenanthoides*, *Cincoides fuscus*, *Ochetorhyncgus ruficaudus*, *Phygilus fruticeti*, *Leptasthenura fuliginiceps*, *Poospiza bilivariana*, *Muscisaxicola griseus*, *Geositta punensis*, *Catamenia inornata* de estas las especies restringidas a ambientes bajos fueron (*Poospiza hypochondria*, *Minus dorsalis*, *Ochthoeca leucophrys*, *Lesbianuna*, *Knipolegus aterrimus*, *Geositta rufipennis*, *Sicalis flaveola*, *Gnorimopsar chopi*) y las restringidas a ambientes altos (*Muscisaxicola maculirostris*, *Diglossa brunneiventris*, *Orochelidon murina*, *Oreotrochilus estella*, *Phrygilus unicolor*, *Phrygilus plebejus*, *Muscisaxicola plebejus*, *Muscisaxicola cinereus*). Las aves tienen la capacidad de indicar varias condiciones o características del hábitat, por lo que su presencia o ausencia pueden indicar alteraciones ambientales ya que muchas toleran, pero otras muy sensibles buscan un hábitat más saludable o mueren, en la ciudad La Paz fue muy claro este estudio que reveló varias características de avifauna con alteración ambiental en la zona urbana, esto con un periodo de tiempo no tan extenso, criterios simples y muy económico. Cabe resaltar que para seleccionar especies bioindicadoras como primera medida se selecciona los objetivos de indicación, seguido de indicadores potenciales que se pueden seleccionar basado en un grupo de criterios, como se desarrolló en este estudio, luego es importante establecer la relación del mismo con el estado ambiental. Las aves son buena opción de monitoreo para evaluar la calidad del aire ya que recorren a gran escala, su frecuencia y abundancia depende de las características del hábitat; según resultados la avifauna

existente en esta ciudad refleja un estado de alternación ambiental urbana, y en cuanto a las especies restringidas como *Upucerthia* y *Leptasthenura* indican zonas con vegetación poco intervenida por actividad humana, el dilema es que en la ciudad La Paz es muy baja la vegetación nativa que tiene, y en algunas zonas si dominan la vegetación exótica, pero esta vegetación no tiene matorral como los arbustos nativos y las aves gustan del matorral, por eso en el presente estudio quedó plasmado realizar recuperación y restauración de vegetación nativa para en próximos monitoreos de la calidad del aire en La Paz (Villegas *et al.*, 2008).

Estudios con microorganismos

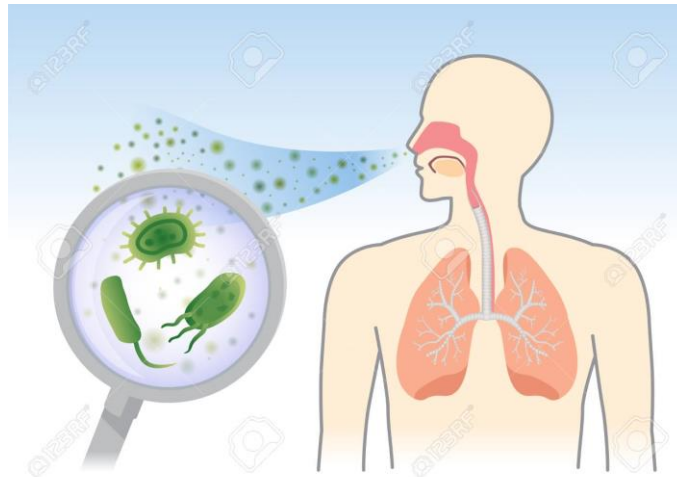


Imagen 10. Microorganismos. 123RF.

❖ Estudios Nacionales:

En Neiva Colombia, se evaluó e identificó hongos y bacterias presentes en la atmósfera de esta ciudad teniendo presente la humedad relativa y temperatura haciendo énfasis en sus propiedades de inocuidad y patogenicidad, los microorganismos se dispersan en el aire tanto en ambientes exteriores como ambientes interiores, el aire es el encargado de recoger manada de microorganismos de distintas fuentes tanto naturales (plantas, suelo, agua) como antropogénicos (comercio, industrias), producen desechos físicos, químicos y biológicos lo que produce material particulado que contribuye a ocultar estos hongos y bacterias en su dispersión por toda la atmósfera, estos microorganismos indican contaminación en el ambiente que causa enfermedades respiratorias tales como neumonía, bronquitis, pulmonía, asma, además de otros problemas en la piel. En cuanto a las plantas también se ven afectadas por ciertas toxinas patógenas que causan a los cultivos efectos patológicos, en ambientes interiores de edificios, estatuas, estructuras que provocan deterioro. Estos estudios de aire fueron realizados en 6 sitios muy estratégicos de la ciudad, estos fueron: la zona industrial del Norte que contiene altos niveles de contaminación, la zona industrial del sur también altamente contaminada por diversas empresas industriales, automotores, comercio de productos de la canasta familiar de abastos, estaciones de gasolina, etc. Universidad Sur colombiana con importante presencia de personas en la misma y barrios cercanos, centro de la ciudad con importante influencia de personal, bastantes áreas comerciales y edificaciones. Río Magdalena con alta presencia de turistas y la zona rural de Oriente intervenida por la humanidad, la recolección de muestras se hicieron en época sequía perteneciente al mes de junio y el otro muestreo fue en época de lluvia en el mes de noviembre, para definir los géneros y especies fúngicas se realizó mediante la observación de las estructuras, hifas, conidióforos, métulas y así mismo las

conidias, en cuanto las bacterias para definir su género y especie tomaron distintas pruebas bioquímicas tales como fermentación lactosa, coagulasa, catalasa, fermentación de azúcar en agar y prueba de oxidasa. Los resultados obtenidos indican que los factores ambientales como la temperatura y la humedad relativa fueron clave para el aumento y crecimiento de microorganismos en el aire, en especial las bacterias que en temporada de sequía tuvieron mayor número de UFC. Por otro lado en la zona industrial norte, la zona industrial del sur y la Universidad Surcolombiana fueron los sitios que reportaron mayor proliferación de microorganismos y esto se debe a la gran contaminación ambiental que existe en estas zonas junto a factores sociales, biológicos, climáticos y geográficos que estallan un alto contenido microbiano en el aire a diferencia del Río Magdalena tuvo menos crecimiento microbiano, debido a que estas zonas naturales contienen una menor contaminación atmosférica, los bacilos grampositivos no esporulados y gramnegativos fueron relacionados con enfermedades respiratorias y otras patologías como amigdalitis y faringitis. El género *Aspergillus* sp fue el que tuvo mayor cantidad de especies perjudiciales para la salud de la humanidad y los géneros *Penicillium* sp, *Aureobasidium* sp son productores de toxinas perjudiciales para el hombre y alimentos. *Curvularia* sp. y *Fusarium* sp. Son patológicos para las plantas, animales y el hombre; *Cladosporium* sp son hongos muy asociados al asma, por lo que se confirma finalmente que los hongos y bacterias sirven como bioindicadores de la calidad del aire en el Municipio de Neiva (Méndez *et al.*, 2015).

❖ Estudios extranjeros:

Las facultades de Ciencias Agropecuarias y Química farmacia de la Universidad Marta Abreu de las Villas junto al Departamento de Meteorología de la academia de ciencias de Cuba, realizaron un estudio donde muestrearon esporas de hongos presentes en el aire de la ciudad de Santa Clara, durante todas las semanas a partir del mes de diciembre de años 2001 hasta el mes de abril del año 2003, fue necesario la utilización de cazaesporas en cada punto de muestreo establecido en la ciudad ya que los vientos estaban muy fuertes y en direcciones opuestas. También se llevó a cabo otros muestreos todos los días desde octubre de 2002 a enero de 2003 y otros muestreos cada hora desde julio de 2002 a enero de 2003 donde este periodo de tiempo correspondía a temporadas secas y de lluvia, tuvieron en cuenta parámetros meteorológicos como la temperatura máxima, media y mínima del aire, la velocidad del viento, la humedad relativa y la lluvia. Los resultados dieron a conocer algunos géneros de hongos muy frecuentes tales como: *Cladosporium*, *Tetraploa*, *Uredinales*, *Alternaria*, *Nigrospora*, *Curvularia*, *Cercospora*, *Helminthosporium*, donde se pudo observar que en los meses de agosto y octubre hubo mayor cantidad de esporas, estos hongos son bioindicadores de la calidad del aire ya que muchos de estos géneros están asociados a ambientes contaminados, de esta manera son útiles para diagnosticar la calidad ambiental de sitios urbanos (Herrera *et al.*, 2003).

La mala calidad del aire en ambientes interiores es una de las causas de muchos problemas de salud tales como respiratorios, fatiga, infecciones, alergias y cáncer, para las personas que mantienen en estos lugares, instituciones como la Agencia de Protección del medio Ambiente (EPA) y así mismo, la Agencia Federal de Salud e Higiene Ocupacional (OSHA) tiene métodos y equipos de monitoreo para detectar riesgos dentro de industrias o sitios de trabajo que puedan poner en riesgo la salud de sus trabajadores ofreciendo

resultados excelentes con costos razonables, ya que según la agencia de protección ambiental de Estados Unidos la concentración de la contaminación en ambientes interiores puede ser de 10 a 100 veces mayor que en sitios exteriores. En la universidad del Zulia de Venezuela evaluaron la calidad microbiológica y fisicoquímica del aire en 3 laboratorios de la facultad de ingeniería, este estudio se realizó con el fin de evaluar cuantitativamente y cualitativamente la calidad del aire en el interior de 3 laboratorios de la facultad de ingeniería (laboratorio de tecnología de alimentos, laboratorio de fermentaciones y laboratorio de carbón), usando como bioindicador la presencia de bacterias además de otros indicadores como polvo respirable, plomo y sílice, junto con parámetros físicos como la humedad y temperatura, todo esto teniendo en cuenta los límites permitidos por las normas de la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN). Los resultados dieron a conocer que el polvo presente no sobrepasó el límite, las concentraciones de Silice y Plomo tampoco excedieron los límites permisibles y fueron de 0.05 mg/m^3 y 0.10 mg/m^3 , igualmente con los con los parámetros físicos con excepción de la humedad relativa que se excedió en un 60% en los ambientes de los 3 laboratorios, el laboratorio de carbón fue el que presentó mayor concentración de Plomo, Silice, polvo y bacterias, este estudio se llevó a cabo desde el mes de julio hasta el mes de diciembre de 2001, en el laboratorio de carbón se pusieron 3 puntos de muestreo y en los otros dos laboratorios se pusieron 4 puntos, las muestras de aire se realizaron utilizando la técnica de DTL junto con un medidor de flujo, una bomba de succión. Para evaluar el polvo y el contenido de Plomo y Silice se realizó por medio del método gravimétrico para un total de 18 muestras que se tomaron con el uso de bombas de muestreo, los resultados arrojaron una menor cantidad de bacterias gram negativas que bacterias positivas, la mayor concentración de bacterias fue obtenida en el

laboratorio de carbón, enseguida el laboratorio de estudios de corrosión y por último el laboratorio de Tecnología de alimentos, bioindicando de esta manera la presencia de contaminación (García *et al*, 2005).

En 1999 en Lima Perú evaluaron la presencia de hongos atmosféricos productores de micotoxinas de paulatina que se alojan en las manzanas en descomposición, este estudio se llevó a cabo en 17 plazas de mercado de esta ciudad, donde estos hongos contaminan el medio ambiente bajo la presencia de esporas que se reproducen cada vez más. Se tomaron muestras durante la primavera, otoño y verano realizando 3 muestreos al día. Teniendo en cuenta las variaciones climatológicas como lluvia, corrientes de aire, iluminación y turbulencias afectan la dispersión de hongos en el aire con la exposición de agar papa y dextrosa con cloranfenicol, donde se obtuvo la mayor presencia del hongo *Penicillium* durante las tres estaciones en mercados de puente piedra (27.05%), Mercadillo de comas (26.32%), Mercado de frutas San Luis (24.86%) y el mercado municipal La Victoria (25.96%) donde en cada sitio se encontró 36 manzanas en estado de descomposición donde salieron positivas a la presencia de Patulina. También fueron encontrados 52 géneros de hongos anemófilos dentro de los que se encontraron 11 géneros del hongo productor de micotoxinas con 1959 UFC tales como *Alternaria*, *Aspergillus*, *Cephalosporium*, *Cladosporium*, *Fusarium*, *Paecilomyces*, *Penicilium*, *Puhomyces*, *Trichoderma*, *Stachybotris* y *Trichotecium*. 11 géneros de hongos contaminantes de alimentos con 742 UFC *Aurebasidium*, *Candida*, *Circinella*, *Epiccocum*, *Geotrichum*, *Helmimhosporium*, *Mucor*, *Nigrospora*, *Rhizopus*, *Rhodotorula* y 30 géneros de hongos Fito patógenos con 1097 UFC tales como *Cordana*, *Cylindrocladium*, *Cryso sporium*, *Drechslera*, *Diheterospora*, *Diplodia*, *Gillmaniella*, *Gliomastix*, *Gonatobotrium*, *Graphium*,

Hormodendrum, Humicola, Mycelia steril, Papularia, Oidiodemmdrom, Oedocephalum, Phoma, Papulospora, Rhinocladiella, Sepedonium, Scopurialiopsis, Stemphylium, Torula, Torulomyces, Trichurus, Ulocladium, verticillium, Volutella. Los hongos productores de fitotoxinas fueron los que tuvieron mayor presencia y su mayor intensidad se dio en la primavera con 829 UFC, justamente cuando los vientos estuvieron intensos y hubo bastante vegetación, en seguida siguió la temporalidad de otoño con 1483 UFC donde también hubo presencia de viento, pero llovió y esto hizo que los hongos incrementaran. En cambio, en el verano con 337 UFC fue la menor proliferación y presencia de hongos debido a las fuertes radiaciones ultravioletas que provocaron la desecación de esporas flotantes (Soriano *et al.*, 2002).

En el noroeste de Argentina se estudiaron micro hongos anemófilos al aire libre en dos ciudades, una con resistencia de longitud $58^{\circ} 51'$ al oeste y $27^{\circ} 27'$ de latitud sur, la otra ciudad tipo corrientes a $58^{\circ} 51'$ de longitud al oeste y $27^{\circ} 27'$ de latitud sur, durante las estaciones de primavera en el año 2000 y otoño del año 2001, con el fin de conocer la carga fúngica del aire y a la vez la variación diaria y estacional, ya que de esta manera es posible conocer y analizar los diversos problemas patológicos en los vegetales, animales y la humanidad. Así mismo, la industria de alimentos que se ve afectada por la presencia de hongos en el ambiente durante las etapas de manufactura y almacenamiento, recalando que la calidad del aire es uno de los tantos factores de vital importancia para una buena salud ambiental y en esto la carga de hongos tiene mucho que ver. En el presente estudio utilizaron la técnica de deposición gravitacional en placas de Petri de agar muestreando 2 sitios claves de cada ciudad uno en el centro de la ciudad donde es muy transitado y otro sitio con bastante vegetación y con 2 horarios diferentes uno en la mañana y otro al medio

día, estas muestras fueron tomadas cada 15 días, en los muestreos de las dos estaciones de cada ciudad fueron aislados 571 colonias de hongos tipo filamentosos donde se identificaron 35 géneros y 60 especies. Por otra parte, los resultados arrojaron diferencias entre la ciudad residencial y la corriente, especialmente para la estación de otoño que se observó una mayor presencia de géneros en las 2 ciudades, estos fueron: *Trichoderma*, *Curvularia*, *Alternaria*, *Fusarium*, *Phoma*, *Penicillium*, *Aspergillus* y *Cladosporium*, en la ciudad de resistencia la frecuencia de aislamientos entre las dos estaciones no hubo diferencias significativas, en cuanto a los horarios hubo mayor cantidad de aislamientos a medio día que en horas de la mañana, en la ciudad de corrientes la frecuencia neta de aislamientos fue menor en otoño. En cuanto a los sitios hubo diferencias significativas y en horarios del medio día fue mayor su frecuencia en la zona de bastante tránsito. Que en corrientes no haya diferencias en las frecuencias netas de aislamiento y en la ciudad de resistencia no, se debe a la inversión de temperaturas lo que produce la imposibilidad de que el viento se desplace de manera normal verticalmente, lo que favorece la presencia de contaminantes sólidos que han suspendido las fuentes móviles y de las mismas personas de la ciudad (Esquivel *et al.*, 2003).

En el año 2017 evaluaron la contaminación ambiental fúngica sobre la línea del transporte público de la ciudad de Ayacucho – Venezuela, existiendo la probabilidad de una alta contaminación a causa de las líneas de transporte de esta ciudad, cabe resaltar que esta contaminación es favorable para que los hongos en forma de esporas tengan supervivencia y se propaguen, lo cual no es conveniente que permanezcan en el ambiente por ser nocivos para la salud. Los hongos fueron detectados y muestreados sobre placas de agar y luego fueron incubadas durante una semana a 25 °C, identificaron los géneros de las

colonias microscópicas y macroscópicas por el método de observación con base en las claves que propuso Barnett, también tomaron muestras de aire en horas pico con la técnica Omelianski donde hallaron niveles altos y medios de contaminación fúngica, en el caso de la línea 20 se contó 1496 ufc/m³, la línea 2 con 1176 ufc/m³, la línea 14 con 1040 ufc/m³ y la línea 10 con 936 ufc/m³, estas fueron las más contaminadas y las menos contaminadas fue la línea 13 con 480 ufc/m³, línea 11 y 9 con 560 ufc/m³, para un total de 165 colonias de hongos aislados tipo filamentosos donde tuvieron una frecuencia de los géneros *Aspergillus* del 28% con 46 colonias, *Penicillium* del 27% con 45 colonias, *Rhizopus* 18% con 30 colonias, *Alternaria* 12% con 19 colonias, y los géneros *Fusarium* 3% con 5 colonias, *Helmintosporium* 2% con 3 colonias, *Paecilomyces* 0.6% con 1 colonia, levaduras y *Cladosporium* 2% con 4 colonias se encontraron en porcentajes muy mínimos (Vilchez, 2018).

Ventajas y desventajas

Ventajas y desventajas de los bioindicadores de la calidad del aire	
Ventajas	Desventajas
Hacer uso de bioindicadores para monitorear la calidad del aire es	Pueden ocasionarse inconvenientes con la estandarización

<p>muy ventajoso ya que se puede determinar, evaluar, integrar y observar directamente los impactos o efectos de los contaminantes atmosféricos sobre seres vivos presentes en determinada zona o ecosistema de estudio (González, 2014).</p> <p>Tienen buena habilidad bioindicadora y cuentan con abundancia de especies (mares, 2017).</p> <p>A diferencia del sistema tradicional que evalúa exclusivamente el aire y sus componentes haciendo uso de técnicas y equipos de monitoreo con costos elevados, además de su complejidad, así mismo,</p> <p>Algunos de estos seres bioindicadores tienen la capacidad de</p>	<p>de procedimientos y metodologías (Oller, 2017).</p> <p>Su crecimiento es lento como es el caso de los líquenes y musgos, por lo que no se pueden implementar para estudios a corto plazo (Vaillant, 2014).</p> <p>La generación de datos para el estudio es lenta (Botero, 2010).</p> <p>Los resultados obtenidos pueden haber tenido influencia por otros factores de su entorno como el suelo (Figuroa & Méndez, 2015).</p> <p>Otra de las desventajas es que no ofrecen mediciones puntuales ya que el resultado obtenido es de todo el tiempo en que el organismo ha estado expuesto a la contaminación (Canseco <i>et al.</i>, 2006).</p>
---	---

<p>acumular contaminantes facilitando de esta manera su estudio (González <i>et al.</i>, 2014).</p> <p>Existen estudios históricos y actuales que se han venido desarrollando y han tenido observación de efectos fisiológicos siendo así buenos indicadores de fuentes contaminantes con los diversos grados de dispersión (Romero <i>et al.</i>, 2006).</p> <p>Existen manuales con métodos establecidos para recolectar y registrar información, así como para llevar a cabo todo el proceso de estudio para evaluar la calidad del aire por medio de bioindicadores, de esta manera se puede llevar a cabo estudios por personas sin mucho conocimiento del tema (García <i>et al.</i>, 2017).</p>	<p>Durante el desarrollo de un estudio para evaluar la calidad del aire puede haber exposición previa a elementos contaminantes (Anze <i>et al.</i>, 2007).</p> <p>A veces se requiere de otros estudios adicionales para demostrar la correlación entre variables tanto bióticas como abióticas, al igual que la causa y efecto de la variable que se mide junto a la medida del bioindicador (González, 2014).</p> <p>Inconvenientes con la estandarización de procedimientos y metodologías empleados (Instituto Nacional de Ecología, 2014).</p> <p>Es indispensable ajustar protocolos a tener en cuenta para el seguimiento biológico en el</p>
--	---

<p>Cabe resaltar que no existe mantenimiento ni uso de electricidad (Puig, 2009).</p> <p>Proporcionan una medida de intensidad y múltiples respuestas a los impactos generados y estrés ambiental presente en el ecosistema (Jaramillo & Botero, 2010).</p> <p>Los bioindicadores son organismos que dan resultado de un extenso lapso temporal de residencia en un ecosistema durante tiempos del pasado, presente y futuro estando en determinadas condiciones ambientales, por lo cual evalúan el estado ecológico y a su vez su evolución con el pasar del tiempo (Mares, 2017).</p>	<p>ambiente, esto para tener en cuenta las condiciones climatológicas y posibles diferencias que existen entre ecosistemas (González, 2014).</p> <p>No detectan impactos sutiles, ni tampoco dan a conocer resultados cuantitativos, comparado con el análisis químico y físico tradicional (González <i>et al.</i>, 2014).</p> <p>En algunos casos se necesita de una persona que tenga experiencia muestreando (Instituto Nacional de ecología, 2014).</p> <p>En forma adicional, aparentemente requiere a menudo de personal con cierta experiencia y el muestreo puede consumir más tiempo, entre otras objeciones (Holt & Miller 2011).</p>
--	--

<p>Son altamente sensibles por lo que su desarrollo, morfología junto a su presencia o ausencia en el ambiente indica la presencia de contaminantes (Jaramillo & Botero, 2010).</p> <p>Los datos generados pueden ser comparados y usados con confianza para la gestión de programas que evalúan la calidad del aire (Instituto Nacional de Ecología, 2014).</p> <p>En el caso de los líquenes, musgos y claveles de aire tienen un largo tiempo de vida, por lo que tienen la capacidad de evaluar largos periodos de tiempo (Boffi <i>et al.</i>, 2003).</p> <p>El uso de bioindicadores es una alternativa con gran potencial a muy bajo costo por su simplicidad de</p>	
---	--

<p>operación, identificando la presencia de contaminantes junto a sus efectos de la contaminación del aire (Instituto Nacional de Ecología, 2014).</p>	
--	--

Tabla 2: Ventajas y desventajas de los bioindicadores de la calidad del aire

Propuesta de valor

Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible "el aire es un fluido que forma la atmósfera de la tierra, constituido por una mezcla gaseosa cuya composición normal es de por lo menos el 20% de oxígeno, 77% de nitrógeno y proporciones variables de gases inertes y vapor de agua en relación volumétrica", el aire contiene dos gases fundamentales para la vida, el CO₂ es vital en la fotosíntesis facilitando así la vida en el planeta y O₂ vital para la respiración de los seres vivos. Teniendo en cuenta que el deterioro del aire está ligado directamente con temas socioculturales, políticos, ideológicos, técnicos y sobre todo económicos ocasionando así el aumento de los niveles de contaminación atmosférica, siendo esto un grave problema ambiental que afecta la salud de la ciudadanía, además existe estudios estadísticos donde demuestran detalladamente los altos porcentajes de problemas de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, además de las muertes generadas.

En Colombia la mayoría de sitios y zonas urbanas no cuentan con una red de monitoreo que evalúe la calidad del aire de forma tradicional (físico químico) debido al alto costo económico que demanda la puesta en marcha de la misma (IDEAM, 2008), por ende, propongo la implementación de redes bioindicadoras, ya que estos por su economía (bajo costo) y fácil manejo brindan la oportunidad de tener una gran cantidad de estaciones de muestreo y monitoreo que evalúan la calidad del aire en aquellos sitios, especialmente urbanos con presencia de fuentes que generan contaminación atmosférica y así mismo, empleen estrategias que mitiguen esta contaminación que hasta el momento no han tenido la oportunidad de hacerlo, por falta de recursos para conocer el estado o nivel de contaminación atmosférico presente (Figueroa & Méndez, 2015).

Por otra parte, los bioindicadores son excelente alternativa para implementar junto a los medidores químicos y físicos puesto que juntos se complementan (Mares, 2017), por ejemplo cuando los niveles de contaminación son muy bajos tienen que adaptar otros equipos tecnológicos con alta sensibilidad para que alcance a detectar estos contaminantes, todo esto sin contar con los altos costos económicos extras que demandan estos equipos, cosa que no sucede con los bioindicadores, dado que estos si detectan desde el más mínimo grado de contaminación al más alto nivel y el resultado que arrojan es de tiempo pasado al presente (Lijteroff *et al.*, 2009). La contaminación atmosférica es un tema de alta prioridad puesto que los altos costos ambientales que deja como consecuencia son grandes y graves, además de los costos económicos y sociales (Simioni, 2003).

Por ejemplo, ciudades como Bogotá, Medellín, Cali y Bucaramanga son grandes focos de contaminación y pese a que son ciudades demasiado grandes cuentan con máximo

14 estaciones de monitoreo como es el caso de Bogotá siendo esta una de las pocas ciudades que tiene un sistema de monitoreo relativamente más completo que las demás ciudades pero que aun así es muy escaso, en el caso de Bucaramanga cuenta con 5 estaciones únicamente y en el departamento de Risaralda solo cuenta con 5 estaciones 2 en Pereira las otras 3 en Dos Quebradas. Por lo tanto, es necesario aumentar la cantidad de estaciones para fortalecer la capacidad de monitoreo, teniendo en cuenta que no se cuenta con una red de monitoreo sofisticada que evalúe la totalidad de zonas en la ciudad con problemas de contaminación y que necesitan evaluar la calidad del aire. La escases de redes de monitoreo en ciudades se debe a la falta de herramientas accesibles que permitan evaluar la calidad del aire, teniendo en cuenta que son ciudades extensas y además cuentan con un alto nivel de contaminación y deterioro de la calidad del aire debido a la evolución acelerada del crecimiento del sector industrial junto a las fuentes móviles. De aquí la importancia de reducir la contaminación para así mismo disminuir el porcentaje de morbilidad por enfermedades respiratorias crónicas y agudas, con el uso de bioindicadores.

Los bioindicadores al ser una herramienta útil, confiable y de fácil acceso es posible tener la oportunidad de implementar un completo sistema de biomonitoreo en diversas zonas de la ciudad donde permitirá evidenciar los efectos de la contaminación y además evaluar el estado de la calidad del aire, todo esto con el fin de suplir necesidades actuales pero buscando un desarrollo equilibrado en el ámbito social, económico y sobre todo ambiental.

Por otra parte existe una amplia diversidad de bioindicadores, a pesar de que los líquenes han sido los más reconocidos como bioindicadores de la calidad del aire, por no

decir que los únicos con amplios estudios en diversos lugares a nivel mundial; los líquenes tienen unos periodos muy extensos de crecimiento y en la presente monografía se ofrece otros tipos de especies bioindicadoras que también pueden ser empleados como bioindicadores de la calidad del aire, tales como los son algunas plantas que además cuentan con un lapso de crecimiento en tiempo mucho más corto, un claro ejemplo es la planta herbácea *vicia faba*. También recomiendo las aves porque estas recorren diversos hábitats o ecosistemas y las abejas dado que son seres que recorren extensas zonas, lo cual son bioindicadores clave para evaluar la calidad del aire en áreas amplias en periodos de tiempo mucho más cortos que los líquenes, permitiendo así ampliar la diversidad y opciones al momento que de escoger un bioindicador de calidad del aire. Las aves, abejas y hongos en realidad no han sido tan trabajados, empleados o estudiados como bioindicadores de la calidad atmosférica, pero que tienen un gran potencial para ser escogidos a la hora de estudiar la calidad de aire en determinadas zonas, en el caso de ciudades como Bogotá, con respecto a los hongos *Akanthomyces* es importante seguir estudiando para determinar las especies con mayor potencial bioindicador de la calidad del aire, aprovechando los sitios donde hay redes de monitoreo. Así mismo, implementar una estrategia de estudio de la abundancia de poblaciones con relación a las mediciones que hace la red de monitoreo para poder determinar su eficiencia y a su vez para su posterior aplicación en esta ciudad teniendo en cuenta que no se cuenta con una red de monitoreo de calidad.

Todo esto sin subestimar la eficiencia y el efecto bioindicador de los líquenes, todo lo contrario, puesto que son excelentes bioindicadores para evaluar la calidad del aire en

temporalidades extensas, pero para estudios a corto plazo si tiene desventaja por ser perennes en su desarrollo.

Bibliografía

Acevedo, S & Charry, Y. (2018). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire.

Recuperado de: <http://red.uao.edu.co/bitstream/10614/10474/4/T08006.pdf>

Acosta, J. (2017). Módulo: Contaminación atmosférica contaminantes: características,

origen y efectos. Recuperado

de: <https://static.eoi.es/savia/documents/componente48105.pdf>

Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición. (2020). Hidrocarburos

Aromáticos Policíclicos (HAPs). Recuperado de:

https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/web/seguridad_alimentaria/subdetalle/haps.htm

Aguilar, A. (2005). Los peces como indicadores de la calidad ecológica del agua. *Revista*

digital Universitaria, Volumen 6 Número 8 • ISSN: 1067-6079. Recuperado de:

http://www.revista.unam.mx/vol.6/num8/art78/ago_art78.pdf

Aguilera, A., Fernández, R., Córdoba, J & Ortiz, A. (2014). Diagnóstico microbiológico de

las hepatitis víricas. *Eimc*, ISBN: 978-84-617-1116-1. Recuperado de:

<https://seimc.org/contenidos/documentoscientificos/procedimientosmicrobiologia/seimc-procedimientomicrobiologia50.pdf>

Aguirre, J & Rangel, J. (2008). Riqueza y aspectos ecológicos y fitogeográficos sobre la

flora de musgos. Recuperado de:

<https://www.researchgate.net/publication/339513539>

- Akanksha, J., Brahma, N., Singh, S., Singh, H & Surendra, S. (2010). Exploring Biodiversity as Bioindicators for Water Pollution. *National Conference on Biodiversity, Development and Poverty Alleviation*. Recuperado de:
<http://www.upsbdb.org/pdf/Souvenir2010/8.pdf>
- Almada, M & Sarquis, J. (2017). Diversidad de arañas del suelo y su relación con ambientes heterogéneos del Parque General San Martín, Entre Ríos, Argentina. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Vol. 88. Núm. 3. Recuperado de:
<https://www.elsevier.es/es-revista-revista-mexicana-biodiversidad-91-articulo-diversidad-aranas-del-suelo-su-S1870345317301197>
- Almagro, A. (2014). *Aves taxonomía*. Recuperado de:
https://www.academia.edu/31016035/Aves_taxonomia
- Alonso, M., Mosquera, P., Hampel, H & Vázquez, R. (2017). Crustáceos bentónicos y macrófitos como indicadores de calidad ecológica en los lagos de los Andes Australes de Ecuador. Recuperado de:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7133926>
- Alonso, M., Wilkinson, M., Risio, C., Marqués, R & Castro, M. (2005). Utilización de especies del género *Tillandsia* como biomonitores de la contaminación atmosférica utilizando técnicas radioquímicas. *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – UBA*. Recuperado de:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/048/32048929.pdf

Alvarado, V., Morales, M & Larrota, E. (2013). Bromeliaceae en algunos municipios de Boyacá y Casanare, Colombia. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, ISSN 0370-3908, Vol. 37, N°. 142. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4533170>

Álvarez, R., Espino, G., Ramos, A & Gonzáles, I. (2013). Aquatic insects' indicators of water quality in Mexico: study cases, Copalita, Zimatán and Coyula rivers, Oaxaca. *Revista Mexicana Biodiversidad*, vol.84 no.1. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-34532013000100028

Ambrosia, M & Bringas, B. (2017). Evaluación de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica de origen vehicular en tres zonas del distrito de Cajamarca en el año 2017". Recuperado de: <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/532/Evaluaci%C3%B3n%20de%20l%C3%ADquenes%20como%20bioindicadores%20de%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ambrosio, M & Bringas, B. (2017). Evaluación de líquenes como Bioindicadores de contaminación atmosférica de origen vehicular en tres zonas del distrito de Cajamarca en el año 2017. *Universidad privada Antonio Guillermo Urrelo, Facultad de ingeniería*. Recuperado de: <http://repositorio.upagu.edu.pe/bitstream/handle/UPAGU/532/Evaluaci%C3%B3n%20de%20l%C3%ADquenes%20como%20bioindicadores%20de%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Anze, R., Franken, M., Zaballa, M., Pinto, M., Zeballos, G., Cuadros, M., Canseco, A., Rocha, A., Estellano, V & Susana, G. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Unidad de Calidad Ambiental, Instituto de Ecología Carrera de Biología, UMSA, La Paz, Bolivia*. Recuperado de: http://cebem.org/revistaredesma/vol1/pdf/redesma0101_art03.pdf
- Anze, R., Franken, M., Zaballa, M., Pinto, M., Zeballos, G., Cuadros, M., Canseco, A., De la Rocha, A., Estellano, V & Del Granado, S. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA*. Recuperado de: http://cebem.org/revistaredesma/vol1/pdf/redesma0101_art03.pdf
- Araneda, A., Undurraga, P., López, D., Saez, K. & Barra, R. (2016). Capítulo III: Uso de lombrices de tierra como indicador de exposición a pesticidas en suelos bajo condiciones convencionales y orgánicas administración. *Revista Chilena de Investigación Agropecuaria*, P. 32. Recuperado de: http://repositorio.udec.cl/bitstream/11594/2130/3/Tesis_Uso_de_la_lombriz_de_tierra.Image.Marked.pdf
- Aránguez, E., Ordóñez, J., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A & Galán, A. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española Salud Pública*, 73: 123-132 N.º 2. Recuperado de: http://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf
- Aránguez, E., Serrano, N., Patier, A., Ordóñez, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia.

Rev. Esp. Salud Publica vol.73 no.2. Recuperado de:

http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57271999000200003

Arcila, A & Lozano, F. (2003). Capítulo 9: Hormigas como herramienta para la bioindicación y el monitoreo. *Smithsonian Institution Press*. Recuperado de: <http://repository.humboldt.org.co/bitstream/handle/20.500.11761/32961/978-958-8151-23-6.pdf?sequence=1#page=141>

Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Revista luna azul*, N 34. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321727348012.pdf>

Arenas, A & Armbrecht, I. (2015). Hormigas y carábidos en cuatro ambientes del piedemonte del Parque Nacional Natural Farallones de Cali, Colombia. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/280445517>

Arnaldos, M., García, M & Presa, J. (2010). Los artrópodos en la conservación. Recuperado de: [https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/23495/1/EFlos%20artropodosenlaco nservacion.pdf](https://digitum.um.es/digitum/bitstream/10201/23495/1/EFlos%20artropodosenlaco%20nervacion.pdf)

Astegiano, J., Ferreras, A., Torres, C & Subils, R. (2007). Proliferación de “claveles del aire” (I): diversidad sobre algarrobos de jardines domésticos y percepción de los pobladores. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/262673593>

- Astier, M., Maass, M., Etchevers & Barra, J. (2002). Derivación de indicadores de calidad de suelos en el contexto de la agricultura sustentable. *Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada A.C.* Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/pdf/302/30236511.pdf>
- Astiz, S & Alvarez, H. (2014). Dinámica del zooplancton y su relación con la calidad de agua en el río Cataniapo, Amazonas, Venezuela. *Repositorio Institucional de la Universidad de los Andes.* Recuperado de:
<http://www.saber.ula.ve/handle/123456789/41142>
- Atoche, L. (2017). Niveles de metales en mejillones procedentes de instalaciones portuarias. Recuperado de:
<https://pdfs.semanticscholar.org/a3ad/7531c076ee994a2dfa5c604dd740339833fd.pdf>
- Azebedo, S., Käffer, M & Lemos, A. (2008). Líquenes como bioindicadores da qualidade do ar numa área de termoeletrica, Rio Grande do Sul, Brasil. 35(3): 425-433, 2. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/310750371>
- Bajpai, R., Shukla, V., Upreti, D & Semwal, M. (2014). Selección de especies bioindicadoras de líquenes adecuadas para monitorear la variabilidad climática en el Himalaya. *Environ Sci Pollut Res.* Recuperado de:
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-3063-9>
- Baldi, B., Vallejos, O., Gastón, P., Lopez, N., Goldaracena, C & Taus, M. (2014). Empleo de la abeja melífera como bioindicador de contaminación ambiental con herbicidas

en áreas cultivadas con soja en la Prov. de Entre Ríos y su relación con el contenido residual en la miel. *Facultad de Bromatología, Universidad Nacional de Entre Ríos (Argentina)*, Vol 4 N 4. Recuperado de:

<https://www.academia.edu/download/36909862/25-98-1-PB.pdf>

Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*. Recuperado de:

https://www.researchgate.net/publication/28083082_Contaminacion_atmosferica_cambio_climatico_y_salud

Baqueiro, E., Borabe, L., Goldaracena, C & Rodríguez, J. (2007). Los moluscos y la contaminación. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 78: 1S- 7S. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v78soct/v78soct1.pdf>

Bautista, A., Etchevers, J., del Castillo, R., y Gutiérrez, C. (2004). La calidad del suelo y sus indicadores. *Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente*, vol. XIII, núm. 2. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/540/54013210.pdf>

Becerril, J., Barrutia, O., García, J., Hernández, A., Olano, J & Garbisu, C. (2007).

Especies nativas de suelos contaminados por metales: aspectos ecofisiológicos y su uso en fitorremediación. *Asociación Española de Ecología Terrestre AEET*.

Recuperado de:

<https://revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/128>

Bellido, J. (2007). Epidemiología de las Gastroenteritis Agudas Víricas. *Sociedad Española de Epidemiología*. Recuperado de:

https://www.seepidemiologia.es/documents/dummy/265-gastroenteritis_agudas_viricas.pdf

Beltrán, M. (2017). Diversidad de termitas en plantaciones comerciales de *Pinus Caribaea* Morelet en la meseta de San Pedro (Casanare). *Sistema de bibliotecas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Recuperado de:

<http://hdl.handle.net/11349/5432>

Benito, Y. (2016). Guía específica de trabajo sobre “Co2 y cambio climático”. Recuperado de: <https://www.programainvestiga.org/pdf/guias2016-17/Guia%20introdutoria%20al%20tema%20CO2%20y%20cambio%20climatico.pdf>

Bertrand, W. (2016). Antecedentes de las Bryophytas. Recuperado de:

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/13912/419365.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Betancor, L., Gadea, M & Flores, K. (2006). *Genética bacteriana*. Recuperado de:

<http://www.higiene.edu.uy/cefa/2008/GeneticaBacteriana.pdf>

Bettie, J & Graham, P. (s, f). Bacteria. *National Human Genome Research Institute*.

Recuperado de: <https://www.genome.gov/es/genetics-glossary/Bacteria>

Boffi, L., Zellner, M & Theinhardt, N. (2003). Área de estudios Ambientales y Urbanos: Análisis de índices de contaminación del Aire en la Ciudad de Buenos Aires.

Departamento de investigaciones. Recuperado de:

http://repositorio.ub.edu.ar/bitstream/handle/123456789/691/104_boffi.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Bofill, S., Casares, P., Albiñana, N., Maluquer, C., Hundesa, A & Girones, R. (2005).

Efectos sobre la salud de la contaminación de agua y alimentos por virus emergentes humanos. *Revista Española Salud Pública*, vol.79 no.2. Recuperado de: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200012

Bofill-Mas, S., Casares, P., Giménez, N., Maluquer, C., Hundesa, A & Girones, R. (2005).

Efectos sobre la salud de la contaminación de agua y alimentos por virus emergentes humanos. *Rev. Esp. Salud Pública*, vol.79 no.2. Recuperado de: http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1135-57272005000200012

Bourguignon T., Drouet, T. Šobotník, J. Hanus, R & Roisin Y. (2015). Influence of Soil

Properties on Soldierless Termite Distribution. *PLOS ONE 10*, (11): e0143776.

Recuperado de: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135341>

Cabezas, S. (2018). Enfermedades infecciosas relacionadas con el agua en el Perú. *Rev.*

Perú. Med. Exp. Salud pública, vol. 35 no. 2. Recuperado de:

http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342018000200020

Calabuig, L., Abad, E., Bayón, E., Fernández, F., Gutiérrez, A., Hernández, A., Polanco, C

& Postigo, M. (1986). Calidad estival de las aguas en los ríos influenciados por la

ciudad de León. Importancia de bioindicadores artrópodos. *Facultad de Ciencias Biológicas y Ambientales*. Recuperado de:

<https://buleria.unileon.es/handle/10612/3697>

California Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHA). (2020). PM_{2.5}.

Recuperado de:

[https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25#:~:text=La%20materia%20particulada%20o%20PM,pulgada\)%20o%20menos%20de%20di%C3%A1metro.&text=Estas%20part%C3%ADculas%20pueden%20provenir%20de,de%20madera%20y%20otras%20actividades.](https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25#:~:text=La%20materia%20particulada%20o%20PM,pulgada)%20o%20menos%20de%20di%C3%A1metro.&text=Estas%20part%C3%ADculas%20pueden%20provenir%20de,de%20madera%20y%20otras%20actividades.)

Calvelo, s., Baccalá, N & Liberatore, S. (2009). Los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en zonas distantes de la Patagonia (Argentina). *Bioindicadores ambientales*, Vol 4 N 2. Recuperado de:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15555270902963459>

Camargo, S., Montaña, N., De la Rosa, C & Montaña, S. (2012). Micorrizas: una gran unión debajo del suelo. *Revista digital universitaria*, Vol.13 N. 7 - ISSN: 1067-6079. Recuperado de: <http://www.revista.unam.mx/vol.13/num7/art72/art72.pdf>

Cánovas, F. (2009). Biología: más que abejas compañeras. *Departamento de Zoología y Antropología Física*. Universidad de Murcia. Recuperado de:

https://www.um.es/eubacteria/eu15/M%C1S_QUE_ABEJAS.pdf

Canseco, A., Anze, R & Franken, M. (2006). Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Acta Nova*, vol.3 no.2

Cochabamba. Recuperado de: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892006000100010&script=sci_arttext

Cañete, J., Leighton, G & Soto, E. (2000). Proposición de un índice de vigilancia ambiental basado en la variabilidad temporal de la abundancia de dos especies de poliquetos bentónicos de bahía Quintero, Chile. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 35(2): 185-194. Recuperado de: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-19572000000100007&script=sci_arttext

Carazo, L., Fernández, R., Gonzáles, F & Rodríguez, J. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *ArchBronconeumol*, 49(1):22–27. Recuperado de: <https://www.archbronconeumol.org/es-pdf-S0300289612001196>

Carballal, R., Casares, M., Gutiérrez, L & Rowe, G. (2006). Capítulo 7: Introducción a los líquenes. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/259638914_C_A_P_I_T_U_L_O_7_INTRODUCCION_A_LOS_LIQUENES

Cardona, G., Arcos, A & Murcia, U. (2005). Abundancia de actinomicetes y micorrizas arbusculares en paisajes fragmentados de la Amazonia colombiana. *Agronomía Colombiana*, 23(2): 317-326. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v23n2/v23n2a17.pdf>

Carlosama, J & Mora, S. (2014). Los macroinvertebrados como indicadores de calidad del suelo en sistemas de manejo agrícola, ganadero y silvopastoril, evaluados en la reserva natural milagros, vereda bellavista, municipio de Sibundoy, putumayo.

Recuperado de:

[http://www.itp.edu.co/web2016/phocadownload/Investigacion/Semilleros/Conserve_mos_nuestros_suelos/MACROINVERTEBADOS%20RESERVA%20MILAGROS%20SAM%20\(2014\).pdf](http://www.itp.edu.co/web2016/phocadownload/Investigacion/Semilleros/Conserve_mos_nuestros_suelos/MACROINVERTEBADOS%20RESERVA%20MILAGROS%20SAM%20(2014).pdf)

Carrera, C. & Fierro, K. 2001. Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua. *EcoCiencia*. Quito. Recuperado de: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/catalog/resGet.php?resId=56374>

Castro, R. (2017). Contaminación por metales pesados cadmio y plomo en agua, sedimento y en mejillón *Mytella Guyanensis* (Lamarck, 1819) en los puentes 5 de junio y perimetral (Estero Salado, Guayaquil-Ecuador). *Repositorio Universidad de Guayaquil*. Recuperado de: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/20970>

Catalá, M. (2014). Bioindicadores: Tendencia de aves comunes. Los investigadores de ToxAmb. Recuperado de: <https://toxamb.wordpress.com/2014/12/29/bioindicadores-tendencia-de-aves-comunes/>

Centro de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Querétaro. (2017). Dióxido de Azufre. Recuperado de: <http://www.cemcaq.mx/contaminacion/bioxido-de-azufre-so2>

Cervantes, A., Gutiérrez, M., Delgado, V & Ruíz, J. (2012). Especies de zooplancton dulceacuícola de Cozumel. Recuperado de: <http://bibliotecasibe.ecosur.mx/sibe/book/000052027>

- Ceschin, S., Zuccarello, V & Canevá, G. (2010). Role of macrophyte communities as bioindicators of water quality: application in the Tiber river basin (Italy). *Diario Oficial de la Societa Botanica Italiana*, 144:3, 528-536. Recuperado de: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/11263500903429221>
- Cesio, F. (2018). Secretos de los claveles y otras flores que viven en el aire. Recuperado de: <https://www.lanacion.com.ar/lifestyle/secretos-claveles-otras-flores-viven-aire-nid2180404>
- Chanatásig, C., Huerta, E., Rojas, P., Ponce, A., Mendoza, J., Morón, A., Vander, H & Castillo, B. (2011). Efecto del uso de suelo en las hormigas (Formicidae: Hymenoptera) de Tikinmul, Campeche, México. *Acta Zool. Mex*, vol. 27 no. 2. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372011000200016
- Clavijo, C & Cázares, M. (2016). Odonatos como bioindicadores de la calidad de agua en Surutato, Sinaloa. *Boletín Sociedad Mexicana de Entomología*, 2: 1-5. Recuperado de: <http://www.boletin.socmexent.org/revista/2016Julio/Bol%201-5.pdf>
- Constitución Política de la República de Colombia. (2008). Artículo 79. Recuperado de: [http://www.oas.org/dsd/EnvironmentLaw/Serviciosambientales/Colombia/\(Microsoft%20Word%20-%20Constituci.pdf](http://www.oas.org/dsd/EnvironmentLaw/Serviciosambientales/Colombia/(Microsoft%20Word%20-%20Constituci.pdf)
- Coral, S., Teixeira, A., Velásquez, E & Waldez, F. (2016). Macro invertebrados del suelo y sus aportes a los servicios ecosistémicos, una visión de su importancia y

comportamiento. *Revista Colombiana de ciencia animal* 8 (Supl):260-267.

Recuperado de: <https://revistas.unisucre.edu.co/index.php/recia/article/view/380>

Cortés, E & Calderón, M. (2015). Aproximación al estado de la calidad de aire del barrio San Fernando basado en el desarrollo de plantas bioindicadoras. Recuperado de: <https://sie.car.gov.co/handle/11349/4825>

Cotín, J. (2012). Birds as bioindicators of pollution in aquatic and terrestrial environments.

Phd thesis. Recuperado de:

http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/35946/2/JCM_PhD_THESIS.pdf

Cuadrado, J. (2011). Tillandsias como bioindicadores de hidrocarburos policíclicos aromáticos. Facultad de Ciencias Escuela Profesional de Química. Recuperado de: http://www.lareferencia.info/vufind/Record/PE_cf8f02fc309f520d62d760e1f0efb65b

Cubas, P. (2018). Briofitos (musgos, hepáticas y antoceros). Recuperado de:

https://www.aulados.net/Botanica/Curso_Botanica/Briofitos/11_Briofitos_texto.pdf

Cuesta, J. (2004). Ecología de los hongos. Recuperado de:

<https://pdfs.semanticscholar.org/3ce0/27a5c338af870469c77bf8845b9a952fd94a.pdf>

Cuesta, O & Cabrera, A. (1992). El dióxido de nitrógeno (NO₂) troposférico en diferentes sistemas meteorológicos en dos localidades de la Cd. de La Habana. *Revista*

Atmósfera, Vol 7, N 1. Recuperado de:

<https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8361/7831>

Daza, M., Martínez, D & Caro, P. (2015). Contaminación microbiológica del aire al interior y el síndrome del edificio enfermo. *Revista de la Facultad de Ciencias de la Salud de la Universidad Libre Seccional Barranquilla*, Vol 10 núm. 2.

Recuperado de:

<http://www.unilibrebaq.edu.co/ojsinvestigacion/index.php/biociencias/article/view/453/433>

Delgadillo, C. (2014). Biodiversidad de Bryophyta (musgos) en México. *Revista mexicana de biodiversidad*, vol.85 supl. Recuperado de:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-34532014000200011&script=sci_arttext&tlng=en

Delgadillo, C. (2014). Biodiversidad de Bryophyta (musgos) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. 85: S100-S105. Recuperado de:

http://www.ib.unam.mx/m/revista/pdfs/11.-_1103.pdf

Díaz, A., Fabré, D., Coutin, G & González, G. (2010). La sensibilización a hongos ambientales y su relación con enfermedades atópicas en escolares. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 26 (4) 647- 655. Recuperado de:

<http://scielo.sld.cu/pdf/mgi/v26n4/mgi07410.pdf>

Díaz, J & Linares, C. (2010). Las causas de la contaminación atmosférica y los contaminantes atmosféricos más importantes. Recuperado de:

<https://ecodes.org/hacemos/cultura-para-la-sostenibilidad/salud-y-medioambiente/observatorio-de-salud-y-medio-ambiente>

Domínguez, M. (2015). La contaminación ambiental, un tema con compromiso social. *Rev.*

P+L, vol.10 no.1 Caldas Jan./June. Recuperado de:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-04552015000100001

Escobar, M., Terneus, E & Yáñez, P. (2013). El plancton como bioindicador de la calidad

del agua en zonas agrícolas andinas: análisis de caso. *From the Selected Works of*

Patricio Yáñez. Recuperado de:

<https://www.researchgate.net/publication/295105482aso>

Espigares, M. (2006). Virus en aguas de consumo. *Higiene y Sanidad Ambiental* 6: 173-

189. Recuperado de:

[https://saludpublica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510159f5f2fa3_Hig.Sanid.Ambient.6.173-189\(2006\).pdf](https://saludpublica.es/secciones/revista/revistaspdf/bc510159f5f2fa3_Hig.Sanid.Ambient.6.173-189(2006).pdf)

Espinosa, A., Arias, C & Masari, M. (2004). Virus en sistemas acuáticos e implicaciones

en salud pública. *Hidrobiológica* 14 (2): 166-178. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.mx/pdf/hbio/v14n2/v14n2a11.pdf>

Esquivel, A. (2013). Nematodos como indicadores ambientales. *Repositorio Académico*

Institucional de la Universidad Nacional de Costa Rica. Recuperado de:

<https://repositorio.una.ac.cr/handle/11056/7460>

- Esquivel, P., Manguiaterra, M., Giusiano, G & Sosa, M. (2003). Microhongos anemofilos en ambientes abiertos de dos ciudades del nordeste Argentino. *Boletín Micológico*, Vol. 18: 21 – 28. Recuperado de:
<https://micologia.uv.cl/index.php/Bolmicol/article/view/376>
- Estévez, J., Montero, A., López, D., González, I., Hernández, D., Pérez, O., Iglesias, H & Wolterbeek, B. (2011). Monitoreo de la contaminación atmosférica en La Habana durante la campaña 2004-2005. *Nucleus*, no.50. Recuperado de:
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-084X2011000200004
- Estrada, C & Fernández, F. (1999). Diversidad de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) en un gradiente sucesional del bosque nublado (Nariño, Colombia). *Revista de Biología Tropical*, vol.47 n.1-2. Recuperado de:
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S0034-77441999000100019&script=sci_arttext
- Estructura y Variación Espacial de las Colectividades de Artrópodos en el Río “Las Juntas” (Catamarca, Argentina). *Huayllu-Bios*, N° 8. Recuperado de:
<http://www.exactas.unca.edu.ar/HUAYLLUBIOS/num-8/1.pdf>
- Fernández, A. (2016). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Recuperado de:
<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/ADRIAN%20FERNANDEZ%20CALERO.pdf>
- Fernández, A., Terrón, A & Barreno, E. (2006). Bioindicadores de la calidad del aire en La Robla (León, noroeste de España) diez años después. *Lazaroa*, 27: 29-41.

Recuperado de:

<http://revistas.ucm.es/index.php/LAZA/article/download/LAZA0606110029A/8929>

Fernández, C & Valdés. (1981). Bibliografía cubana, Musgos. Recuperado de:

<https://ufdcimages.uflib.ufl.edu/AA/00/06/35/88/00074/bc1989198900.pdf>

Fernández, D & Zambrano, G. (2011). Abejas silvestres como estrategia de monitoreo de restauración ecológica en tres veredas del corregimiento la gallera (tambo, cauca), zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Munchique (PNNM). *Boletín Científico Centro de Museos - museo de historia natural*, 15 (1): 51 – 59.

Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bccm/v15n1/v15n1a03.pdf>

Fernández, D & Zambrano, G. (2011). Abejas silvestres como estrategia de monitoreo de restauración ecológica en tres veredas del corregimiento la gallera (Tambo, Cauca), zona de amortiguación del Parque Nacional Natural Munchique (PNNM). *Boletín Científico Centro de Museos, Museo de Historia Natural*, 15 (1): 51 – 59.

Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bccm/v15n1/v15n1a03.pdf>

Fernández, V & Londoño, M. (2015). Poliquetos (Annelida: Polychaeta) como indicadores biológicos de contaminación marina: casos en Colombia. *Gestión y Ambiente*, vol. 18, núm. 1. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169439782012.pdf>

Fernández, V & Londoño, M. (2015). Poliquetos (Annelida: Polychaeta) como indicadores biológicos de contaminación marina: casos en Colombia. *Gestión y Ambiente*, vol. 18, núm. 1. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169439782012.pdf>

Ferrari, C & torres, E. (1998). Contaminación de los alimentos por virus: un problema de salud pública poco comprendido. *Rev. Panam Salud Publica/Pan Am J Public Health*, 3(6). Recuperado de: <https://scielosp.org/pdf/rpsp/v3n6/3n6a1.pdf>

Ferriol, M & López, C. (2020). Ciclo de vida de los musgos. *Ecosistemas agroforestales*. Recuperado de:
<https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/81343/Ferriol%3BL%C3%B3pez%20-%20Ciclo%20de%20vida%20de%20los%20musgos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Figueroa, E & Méndez, A. (2015). Evaluación de la calidad del aire en 8 zonas de la ciudad de Bogotá utilizando los líquenes como bioindicadores. Recuperado de:
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1002&context=ing_ambiental_sanitaria

Figueroa, E & Méndez, A. (2015). Evaluación de la calidad del aire en 8 zonas de la ciudad de Bogotá utilizando los líquenes como bioindicadores. Recuperado de:
https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/3

Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF). (2009). *Ministerio de Educación Gobierno de Chile*. Recuperado de:
<https://www.conicyt.cl/fondef/2009/10/13/utilizan-plantas-para-medir-la-contaminacion/>

Franco, J. (2016). Contaminación atmosférica en centros urbanos desafío para lograr su sostenibilidad: caso de estudio Bogotá. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.co/pdf/ean/n72/n72a13.pdf>

Galán, C., Cariñados, P., Alcázar, P & Domínguez, E. (2007). Manual de Calidad y Gestión de la Red Española de Aerobiología. Recuperado

de: https://www.aerobiologia.com/app/download/5783625283/manual_cast.pdf

Galán, D & Fernández, R. (2006). Implicación de los NOx en la química atmosférica.

Revista electrónica de medio ambiente UCM. Recuperado de:

<https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag->

[41377/2006%202%20david%20galan%20y%20otro.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-41377/2006%202%20david%20galan%20y%20otro.pdf)

Galván, N., Andrade, J., Rodríguez, C & Casandra, C. (2017). Claveles del aire y su vida en las alturas. *Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.* Recuperado de:

https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2017/2017-07-13-

[Chilpa-et-al-Claveles-del-aire.pdf](https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2017/2017-07-13-Chilpa-et-al-Claveles-del-aire.pdf)

Gamboa, M., Reyes, R & Arrivillaga, J. (2008). Macro invertebrados bentónicos como

bioindicadores de salud ambiental. *Boletín de Malariología y Salud Ambiental*, vol.

XLVIII, N° 2. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/239586192>

García, I., Vásquez, S & Cássan, F. (2013). Rizosfera, biodiversidad y agricultura

sustentable. *Asociación Argentina de Microbiología*, ISBN 978-987-26716-1-7.

Recuperado de:

https://www.researchgate.net/profile/Claudia_Azpilicueta#page=108

- García, J., Sarmiento, L., Salvador, M & Porras, L. (2017). Uso de bioindicadores para la evaluación de la calidad del agua en ríos: aplicación en ríos tropicales de alta montaña. Revisión corta. *UGCiencia*, 23, 47-62. Recuperado de:
<https://revistas.ugca.edu.co/index.php/ugciencia/article/download/659/1174/>
- García, M. (2005). Los hidrocarburos policíclicos aromáticos asociados a combustibles fósiles, caracterización, análisis y remediación. Recuperado de:
http://oa.upm.es/400/1/MARIA_JESUS_a_MARTINEZ.pdf
- García, M., Gómez, A., Avonce, N., Zarazúa, G & Barrera, C. (2016). Musgos cultivados, indicadores ambientales de contaminación atmosférica. *Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México*. Recuperado de:
<http://hdl.handle.net/20.500.11799/68675>
- García, M., Robledo, F., Collazos, A., Alvarez, E., Carrandi, B., Toña, F., Viciola, M., Zuaica, D., Méndez, M & Vasquez, M. (2001). Agentes Biológicos. Ministerio de Sanidad y Consumo. Recuperado de:
https://www.mscbs.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/docs/agentes_biologicos.pdf
- García, N., Araujo, I., Fernández, M., Salcedo, W., Cárdenas, C., Fernández, J., Herrera, L., Yabroudi, S & Angulo, N. (2005). Calidad microbiológica y fisicoquímica del aire en tres laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Zulia. *Ciencia*, 13(2), 182 - 192, Maracaibo –Venezuela. Recuperado de:
<https://biblat.unam.mx/es/revista/ciencia-maracaibo/articulo/calidad->

microbiologica-y-fisicoquimica-del-aire-en-tres-laboratorios-de-la-facultad-de-ingenieria-de-la-universidad-del-zulia

García, Y., Ramírez, W & Sánchez, S. (2012). Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes vol.35 no.2 Matanzas*.

Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942012000200001

Garzón, L. (2016). Importancia de las micorrizas arbusculares (ma) para un uso sostenible del suelo en la amazonia colombiana. *Luna Azul*, ISSN 1909-2474. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n42/n42a14.pdf>

Gennari, G. (2019). Manejo racional de las abejas nativas sin aguijón (ANSA). *Desarrollo Sustentable de la Meliponicultura del Sur de Tucumán*. Recuperado de:

https://inta.gob.ar/sites/default/files/libro-manejo_racional_de_las_abejas_nativas_sin_aguijon_ansa.pdf

Gestión Integral de Calidad de Aire y RETC. (2017). Partículas Menores a 10 μ m (PM₁₀) y Partículas Menores a 2.5 μ m (PM_{2.5}). Recuperado de:

<https://www.sema.gob.mx/SGA-MONITOREO-CLASES.htm>

Gestión Integral de Calidad del Aire y RETC. (2017). Ozono. Recuperado de:

<https://www.sema.gob.mx/SGA-MONITOREO-CLASES.htm>

Ghirardi, R., Fosco, M. E., Gervasio, S. G., Imbert, D., Enrique, C., Pacheco, C. G. (2011).

Líquenes y Claveles del Aire como Bioindicadores de Contaminación Atmosférica

en el Microcentro de la Ciudad de Santa Fe. *Ciencia*, Vol. 6, Nº 24. Recuperado de:
<http://www.exactas.unca.edu.ar/revista/v240/pdf/ciencia24-8.pdf>

Ghirardi, R., Fosco, M., Gervasio, S., Imbert, D., Pacheco, C & Enrique, C. (2010).

Líquenes y claveles del aire como bioindicadores de contaminación atmosférica por metales pesados en el microcentro santafesino. *Repositorio Institucional CONICET Digital*. Recuperado de: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/103228>

Gómez, V & Sánchez, P. (2017). Diversidad y potencialidad bioindicadora de las algas de la provincia de Albacete. *Revista de estudios albacetenses*, n. 12 Recuperado de:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6607042>

González, A., Vukasovic, M & Estades, C. (2011). Variación temporal en la abundancia y diversidad de aves en el humedal del Río Itata, región del Bío-Bío, Chile. *Gayana (Concepc.)*, vol.75 no.2. Recuperado de:
https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-65382011000200006&lang=es

González, C., Vallarino, A., Pérez, J & Low, A. (2014). Bioindicadores: guardianes de nuestro futuro ambiental. *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC)*, ISBN 978-607-8429-05-9. Recuperado de: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/Bioindicadores-Guardianes-de-nuestro-futuro-ambiental.pdf>

González, G & Sánchez, L. (2003). Mortalidad asociada con la contaminación atmosférica por SO₂. A propósito de un caso de autopsia médico legal tras un episodio de

polución atmosférica. *Cuadernos de Medicina Forense*, N° 33. Recuperado de:
<http://scielo.isciii.es/pdf/cmfn33/original5.pdf>

González, J. (2014). Bioindicadores como aliados en el monitoreo de condiciones ambientales. *CEGESTI*, No. 252. Recuperado de:
http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_252_240214_es.pdf

Gorza, G. (2007). Biomonitoreo con Abejas: Estaciones Gemelas con Análisis Simultáneos. *Departamento de Agronomía*. Recuperado de:
https://www.apiservices.biz/documents/articulos-es/biomonitoreo_con_abejas.pdf

Granados, D., Hernández, M & Sánchez, A. (2003). Ecología de las plantas epífitas. *Revista Chapingo - Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, vol. 9, núm. 2. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62913142001>

Green, A & Figuerola, J. (2003). Aves acuáticas como bioindicadores en los humedales. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2244831>

Guerra, J. (2011). Los crustáceos caprélidos. Pequeños desconocidos del litoral tarifeño. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4149302>

Guerrero, A., López, A & Antón J. (2005). Ecología microbiana. *Ecosistemas Revista científica de ecología y medio ambiente*. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54014201>

- Guillén, C., Soto, F & Springer, M. (2006). Variables físicas, químicas y biológicas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos en Costa Rica. Recuperado de:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2554717>
- Gutiérrez, E., Flórez, G., Ortega, M & Villaescusa, J. (1992). Pesticidas en las aguas costeras del golfo de California: programa de vigilancia con mejillón 1987-1988. *Ciencias Marinas*, (1992), 18(2): 77-99. Recuperado de:
<http://www.cienciasmarinas.com.mx/index.php/cmarinas/article/view/891/813>
- Gutiérrez, I. (2016). Empleo de *Apis Mellifera* como bioindicador de la contaminación de metales pesados en el término municipal de Córdoba. *Departamento de zoología Universidad de Córdoba*. Recuperado de:
<https://helvia.uco.es/xmlui/bitstream/handle/10396/13253/2016000001367.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gutiérrez, M., & Cardona, C. (2014). Caracterización ecológica de las lombrices (*Pontoscolex corethrurus*) como bioindicadoras de suelos compactados bajo condiciones de alta humedad del suelo con diferentes coberturas vegetales (Zipacón, Cundinamarca). *Revista Científica*, 2(19), 41-55. Recuperado de:
<https://doi.org/10.14483/23448350.6493>
- Guzmán, B & Nava, G. (2015). Vigilancia de las enfermedades vehiculizadas por agua. *Instituto nacional de salud*, ISBN: 978-958-13-0174-4. Recuperado de:
<https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2015%20Enfermedades%20Vehiculizadas%20por%20Agua%202014.pdf>

Hahn-vonHessberg, C., Toro, D., Grajales, A., Duque, J & Serna, L. (2009).

Determinación de la calidad del agua mediante indicadores biológicos y fisicoquímicos, en la estación piscícola, universidad de caldas, municipio de palestina, Colombia. *Boletín científico centro de museos - museo de historia natural*, 13 (2): 89 – 105. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.co/pdf/bccm/v13n2/v13n2a06.pdf>

Hawksworth, D., Iturriaga, T & Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores

inmediatos de contaminación y cambios medio ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22: 71-82. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1130140605700139>

Hernández, R. (2020). Botánica taxonómica. Recuperado de:

<http://www.agro.unc.edu.ar/~wpweb/botaxo/wp-content/uploads/sites/14/2018/06/T1.pdf>

Hernández, U., Juárez, C., Montes de Oca, M., Vargas, J., Cutz-Pool, L y Mejía, B.

(2010). Colémbolos (Hexapoda) como bioindicadores de la calidad de suelos. *Revista mexicana de biodiversidad*, vol. 81, núm. 001. Recuperado de:

<http://www.revista.ib.unam.mx/index.php/bio/article/view/188>

Herrera, L., Carrazana, D & Quiñonez, R. (2003). Los hongos anemófilos de la ciudad de Santa Clara, Cuba. *Centro Agrícola*, No. 3. Recuperado de:

http://cagricola.uclv.edu.cu/descargas/pdf/V30-Numero_3/13CAgricola%203-2003.pdf

IDEAM. (2007). Informe del Estado de la calidad del aire. Recuperado de:

<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/68521396/5.+Informe+del+estado+de+la+calidad+del+aire+2007-2010.pdf/52d841b0-afd0-4b8e-83e5-444c3d17ed29?version=1.0>

IDEAM. (2008). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire.

Recuperado

de:<http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>

IDEAM. (2014). Ozono troposférico. Recuperado de:

<http://www.meteoaeronautica.gov.co/ozono-troposferico>

Infobae. (2006). Con un clavel detectan contaminación en Buenos Aires. Recuperado de:

<https://www.infobae.com/2006/10/05/279732-con-un-clavel-detectan-contaminacion-buenos-aires/>

Instituto de Salud Global Barcelona. (2017). Introducción a la epidemiología ambiental: el caso de la contaminación atmosférica. Recuperado de:

<https://www.isglobal.org/healthisglobal/-/custom-blog-portlet/introduccion-a-la-epidemiologia-ambiental-el-caso-de-la-contaminacion-atmosferica/422917/0>

Instituto Nacional de Ecología. (2014). Manual 1: Principios de medición de la calidad del aire. Recuperado de: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1->

%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf

Instituto Nacional de Salud. (2019). Boletín de prensa. Recuperado de:

<https://www.ins.gov.co/Comunicaciones/Comunicados%20de%20prensa/Carga%20Ambienta%20en%20Colombia%20Prensa%20INS-%2021%20de%20enero%20de%202019.pdf>

Instituto para la Salud Biológica Geoambiental. (2013). El dióxido de azufre SO₂.

Recuperado de: <https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2>

Instituto para la Salud Geoambiental. (2013). Dióxido de carbono CO₂. Recuperado de:

<https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-carbono-co2>

Instituto para la Salud Geoambiental. (2014). Material particulado. Recuperado de:

<https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>

Instituto para la Salud Geoambiental. Dióxido de nitrógeno NO₂. (2014). Recuperado de:

<https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-nitrogeno-no2#:~:text=Qu%C3%A9%20es%3A,principales%20contaminantes%20en%20las%20ciudades.>

Instituto Valenciano de la Edificación. (2019). Dióxido de Azufre (SO₂). Recuperado de:

<http://aire.five.es/en/inicio-aire/100-calidad-del-aire/141-dioxido-de-azufre-so2#--fuentes>

Jaizme, M & Rodríguez, A. (2019). Los microorganismos como bioindicadores de la calidad y salud del suelo. *Instituto Canario de Investigaciones Agrarias*.

Recuperado de: <https://www.icia.es/biomusa/pt/jornadas-y-actividades-pt/primeras-jornadas-de-transferencia-de-idi/19-de-octubre-de-2010-tercera-sesion/33-los-microorganismos-como-bioindicadores-de-calidad-y-salud-del-suelo-m-c/file>

Jaramillo, M & Botero L. (2010). Comunidades liquénicas como bioindicadores de calidad del aire. *Revista Gestión y Ambiente*, vol. 13, núm. 1. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169419998008>

Jardín Botánico. (2007). Familia de las plantas. Recuperado de: <https://www.jardinbotanico.org/parque-jardin-botanico-de-moraleja-de-enmedio/familias-de-plantas/>

Jones, G., Jacobs, D., Kunz, T., Willig, M., & Racey, P. (2009). Carpe noctem: the importance of bats as bioindicators. *Open Acces*, Vol. 8: 93–115 Recuperado de: <https://www.int-res.com/articles/esr2009/8/n008p093.pdf>

Kasso, M & Balakrishnan, M. (2013). Ecological and Economic Importance of Bats (Order Chiroptera). *International Scholar Research Notices*, Vol 13. Recuperado de: <https://doi.org/10.1155/2013/187415>

Klumpp, A & Klumpp, G. (1993). Plants as bioindicators of air pollution at the Serra do Mar near the industrial complex of Cubatão, Brazil. *Environmental Pollution*, 85 109-116. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0269749194902445>

- Knoepp, J., Coleman, D., Crossley, D & Clark, J. (2000). Biological indices of soil quality: an ecosystem case study of their use. Recuperado de:
<http://coweeta.uga.edu/publications/1398.pdf>
- Kuk, J & Delgado, V. (2015). Poliquetos de sustrato arenoso como bioindicadores de contaminación por materia orgánica en la zona urbana de la bahía de Chetumal, Quintana Roo. Recuperado de:
<https://www.researchgate.net/publication/266228832>
- Laurie, M. (2019). Biomonitorio ambiental apícola de la fábrica de cemento ANCAP de minas. Recuperado de:
<https://www.ancap.com.uy/innovaportal/file/2243/1/informe-biomonitorio-con-abejas-2017-2018.pdf>
- Lavornia, J. (2014). Las comunidades liquénicas de las sierras de Tandil (Buenos Aires) como bioindicadoras de contaminación atmosférica. *Universidad nacional de la plata facultad de ciencias naturales y museo doctorado en ciencias naturales, tesis doctoral*. Recuperado de:
http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/54896/Documento_completo__pdf-PDFA2.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Leal, M. (2016). Ecología microbiana, los microorganismos y algunas de sus aplicaciones. Programa gestión de proyectos, Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: https://issuu.com/gestiondeproyectos/docs/libro_ecologia_microbiana

- Lijteroff, R., Lima, L & Prieri, B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista Internacional Contaminación Ambiental*, vol.25 no.2 México. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000200006
- Lizasoain, A. (2015). Detección, cuantificación y caracterización molecular de astrovirus clásicos y emergentes en aguas residuales de uruguay. Recuperado de: <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/5149/1/uy24-17371.pdf>
- Llanes-Baeza, C & González, N. (2002). Evaluación de los mejillones *Mytilopsis sallei* (reclúz) y *brachidontes exustus* (linné) como bioindicadores de materia orgánica en la bahía de Chetumal, México. Recuperado de: <http://148.236.18.64/index.php/rera/article/view/236/192>
- Llatance, W. (2017). Determinación de la calidad del aire mediante el uso de líquenes en la microcuenca del lago pomacochas, distrito florida, provincia Bongará, departamento Amazonas, 2016 – 2017. Recuperado de: <http://repositorio.untrm.edu.pe/bitstream/handle/UNTRM/1222/WENDI%20GUA%20DALUPE%20LLATANCE%20OYARCE.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Lópes, C., Lima, L., Graciele, A., Yaeko, J., Padoveze, M & Uchikawa, K. (2016). Presión ambiental negativa de aire en el área de limpieza del centro de materiales y esterilización: revisión sistemática. *Revista Latino-Am.*

Enfermagem, vol.24 Ribeirão Preto. Recuperado de:

<http://dx.doi.org/10.1590/1518-8345.1140.2781>

López, D. (2003). La actividad de la macro fauna (termitas y oligoquetos) en los suelos de sabana. *Venesuelos*. Recuperado de:

<https://www.researchgate.net/publication/276275329>

Loppi, S., Francalanci, C., Pancini, P., Marchi, G & Caporali, B. (1996). Lichens as bioindicators of air quality in Arezzo (central Italy). *Ecología mediterranea*, tome 22 n°1-2. Recuperado de: https://www.persee.fr/doc/ecmed_0153-8756_1996_num_22_1_1798

Madias, J. (2013). Experiencias en la disminución de emisiones de óxidos de nitrógeno en siderurgia. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/261403311>

Mapa de la calidad del aire en tiempo real. (2020). Contaminación del aire en Bogotá.

Recuperado de: <https://aqicn.org/map/bogota/es/>

Mares, I. (2017). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. *Facultad de farmacia*. Recuperado de:

<http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/IRENE%20MARES%20RUEDA.pdf>

Marín, C. (2018). Conceptos fundamentales en ecología de hongos del suelo: una propuesta pedagógica y de divulgación. *Boletín Micológico*, 33(1):32-56.

Recuperado de: <https://revistas.uv.cl/index.php/Bolmicol/article/view/1168/0>

- Márquez, A., Gregorio, I., Senior, W., Fermín, I., Catañeda, J & González, Á. (2008).
Cuantificación de las concentraciones de metales pesados en tejidos de peces y
crustáceos de la Laguna de Unare, estado Anzoátegui, Venezuela. *Revista
Científica (Maracaibo)*, v.18 n.1. Recuperado de:
http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-22592008000100012
- Martínez, M. (1994). Estudios y perspectivas sobre ecología vegetal en México.
Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/313146012_Ecologia_de_las_plantas_epifitas
- Martínez, M. (2016). Zebrafish (danio rerio) as bioindicator of epigenetic factors present in
drinking water that may affect development and reproductive function. Recuperado
de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=115803>
- Martínez, R. (2010). La importancia de la educación ambiental ante la problemática actual.
Revista Electrónica Educare, Vol. XIV, N° 1, [97-111], ISSN: 1409-42-58.
Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/1941/194114419010.pdf>
- Mastandrea, C., Chichizola, C., Ludueña, B., Sánchez, H., Álvarez, H & Gutiérrez, A.
(2005). Hidrocarburos aromáticos policíclicos. Riesgos para la salud y marcadores
biológicos. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana*, vol. 39, núm. 1. Recuperado
de: <https://www.redalyc.org/pdf/535/53522191006.pdf>

- McGraw, R. (1997). Description of Aerosol Dynamics by the Quadrature Method of Moments. *Aerosol Science and Technology*, vol. 27. Recuperado de: <https://doi.org/10.1080/02786829708965471>
- Medina, J. (2010). La Dieta del Dióxido de Carbono (CO₂). *Conciencia Tecnológica*, No. 39. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/944/94415753009.pdf>
- Mejía, D., Chaparro, M., Duque, J., Chaparro, A & Castañeda, A. (2018). El biomonitoreo magnético como herramienta para la evaluación de patrones de contaminación del aire en un valle tropical utilizando *Tillandsia sp.* 9 (7), 283. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/7/283>
- Mejía, J & Castro C. (2018). Zonación altitudinal de musgos al oeste de la sierra nevada del cocuy (Boyacá, Colombia). *Instituto de Botánica, São Paulo, Brasil*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/14467>
- Meléndez, V., Ayala, R & Delfín, H. (2015). Abejas como bioindicadores de perturbaciones en los ecosistemas y el ambiente. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/280883462>
- Méndez, C., Camacho, J & Echeverry, S. (2015). Identificación de bacterias y hongos en el aire de Neiva, Colombia. *Rev. Salud pública*. 17 (5): 728-737. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rsap/v17n5/v17n5a07.pdf>
- Méndez, V & Monge, J. (2011). El uso de líquenes como biomonitores para evaluar el estado de la contaminación atmosférica a nivel mundial. *Vicerrectoría de*

Investigación, Universidad Estatal a Distancia. Recuperado de:

<https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/download/1188/1219/>

Mendoza, Y. (2016). Especies de zooplancton presentes en agua contaminada con arsénico

en Matehuala, San Luis Potosí, México. *Instituto Potosino de Investigación*

Científica y Tecnológica, A.C .Recuperado de:

<https://ipicyt.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1010/458/3/TMIPICYTM4E72016.pdf>

Menta, C & Remelli, S. (2020). Soil Health and Arthropods: From Complex System to

Worthwhile Investigation. *Nsectos*, 2020,11, 54. Recuperado de:

<https://doi.org/10.3390/insects11010054>

Mercedes, M. (2010). El uso de lombrices de tierra como bioindicadores de la

contaminación del suelo. *Instituto Biológico, CPDPA, Laboratorio de Ecología*

Agroquímica. Av. Conselheiro Rodrigues Alves 1252, São Paulo - SP, 04014-002,

Brasil. Recuperado de:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0065-17372010000500007&lng=es&nrm=iso&tlng=pt

Microorganismos. 123RF. [Imagen]. Recuperado de:

https://es.123rf.com/photo_88931443_olhando-para-bact%C3%A9rias-e-fungos-em-respirar-humano-de-respirar-com-lupa-ilustra%C3%A7%C3%A3o-sobre-a-polui%C3%A7%C3%A3o-do-ar-.html

Miguel, N., Ugasteburu, C., Mateo, R., Ormad, M & Ovelleiro, J. (2015). Estudio de acumulación e infección bacteriana de *pseudomonas aeruginosa* y *enterococcus* sp. en el mejillón cebra. *Artículos técnicos*. Recuperado de:

https://zaguan.unizar.es/record/65312/files/texto_completo.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Contaminación atmosférica.

[Imagen]. Recuperado de:

<https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1801-plantilla->

Ministerio de ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Protocolo para el

monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Recuperado de:

https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/aire/res_2154_021110_manual_diseno.pdf

Ministerio de Salud y Protección Social. (2016). Estrategia para la prevención y control de las enfermedades respiratorias crónicas. P, 32. Recuperado de:

<https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ENT/estrategia-enfermedades-respiratorias-cronicas-2017.pdf>

Ministerios para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Óxidos de nitrógeno. Recuperado de:<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidosenitrogeno.aspx>

- Momo, F., Falco, F & Craig, E. (2003). Las lombrices de tierra como indicadoras del deterioro del suelo. *Revista de Ciencia y Tecnología*, N° 8. Recuperado de: <https://www.ungs.edu.ar/wp-content/uploads/2015/11/Lombrices-como-indicadoras-de-deterioro-del-suelo.pdf>
- Mongiello, C & Otero, P. (2017). El perezoso de las plantas: el clavel del aire. [http://www.revistaboletinbiologica.com.ar/pdfs/N38/botanica%20y%20sociedad%20\(38\).pdf](http://www.revistaboletinbiologica.com.ar/pdfs/N38/botanica%20y%20sociedad%20(38).pdf)
- Montserrat, V. (2014). Los megalópteros de la Península Ibérica (Insecta, Neuropterida, Megaloptera, Sialidae). *Graellsia*, 70(2): e009 Recuperado de: <http://graellsia.revistas.csic.es/index.php/graellsia/article/view/496/516>
- Montaño, N., Sandoval, A., Camargo, S & Sánchez, J. (2010). Los microorganismos: pequeños gigantes. *Ciencia y cultura*, Vol. 17, Núm. 77. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/294/29411989003.pdf>
- Montenegro, L. (2011). Caracterización de algunos aspectos fisiológicos y bioquímicos del musgo pleurozium schreberi relacionados con su capacidad de tolerancia a la deshidratación. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/7623/1/797024.2012.pdf>
- Montesanti, J. (2015). Bioindicadores. *Máster en Ecología y Evolución (Unifesp)*. Recuperado de: <https://www.infoescola.com/ecologia/bioindicadores/>
- Morales, C., Ospino, J., Jiménez, J., Berbén, A & Negritto, M. (2017). Briófitos: un mundo en miniatura. *Boletín de botánica* ISSN: 2539-1690. Recuperado de:

https://www.unimagdalena.edu.co/Content/Public/Docs/Entrada_Facultad3/adjunto_1029-20181004104040_495.pdf

Morales, E., Lücking, R & Anze, R. (2009). Lichens, general text, Bolivia. *Botany*

Lichenology. Recuperado de:

https://www.academia.edu/8289628/Lichens_general_text_Bolivia

Motito, A & Rivera, Y. (2017). Capítulo 8 Briofitas. Pp. 118-133 en: *Diversidad biológica de Cuba: métodos de inventario, monitoreo y colecciones biológicas* (C. A.

Mancina y D. D. Cruz, Eds.). Editorial AMA, La Habana, 502 pp. Recuperado de:

<http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/1454/9/118->

[133_Libro_Biodiversidad_Cuba_Cap%C3%ADtulo%208.pdf](http://repositorio.geotech.cu/jspui/bitstream/1234/1454/9/118-133_Libro_Biodiversidad_Cuba_Cap%C3%ADtulo%208.pdf)

Muñoz, P., Torres, M., Boua, E & Guinea, J. (2007). Zigomicetos y zigomicosis en la era de las nuevas terapias antifúngicas. *Biblioteca virtual en Saude*. Recuperado de:

<https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/ibc-74787>

Nakamura, A., House, A., Catterall, C & Kitching, R. (2007). El uso de hormigas y otros artrópodos del suelo y la basura como bioindicadores de los impactos de la tala de bosques tropicales y el posterior uso de la tierra. *Journal of Insect Conservation*,

11:177–186. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/225362550>

Naranjo, E. (2003). Moluscos continentales de México: Dulceacuícolas. *Rev. Biol. Trop.*,

51 (Suppl. 3): 495-505. Recuperado de:

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/rbt/article/view/26397/26585>

National Geographic España. Abejas para medir los niveles de contaminación. Recuperado de: https://www.nationalgeographic.com.es/naturaleza/abejas-para-medir-nivel-contaminacion_14013

Nava, G., Guzmán, B., González, M & Murillo, C. (2016). Enfermedades Vehiculizadas por Agua (EVA) e Índice de Riesgo de la Calidad Agua (IRCA) en Colombia 2015. *Sistema de información para la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano*. Recuperado de: <https://www.ins.gov.co/sivicap/Documentacin%20SIVICAP/2016%20Enfermedades%20%20vehiculizadas%20por%20agua%202015.pdf>

Neiendam, M y Winding, A. (2002). Microorganisms as indicators of soil health. National Environmental Research Institute, Ministry of the Environment. *In plant science*. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/d5d7/0ed4c9746bd6f481b83e43df2ba17f58178e.pdf>

Noda, Y. (2009). Las Micorrizas: Una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y Forrajes*, v.32 n.2. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942009000200001

Nogales, R. (2010). Indicadores biológicos para la evaluación de la calidad de los suelos. Estación Experimental de Zaidín, *Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEZ-CSIC)*, Granada, España. Recuperado de: <http://www.secsuelo.org/wp-content/uploads/2015/06/2.-Rogelio-Nogales.-Indicadores-biologicos.pdf>

Noriega, P, Medici, A., Murillo, A., Bedón, J., Haro, F & Galecio, G. (2008). LA

GRANJA. *Revista de ciencias de la vida*. Recuperado de:

<https://www.redalyc.org/pdf/4760/476047392004.pdf>

Oller, O. (2018). Empleo de bioindicadores para determinar la calidad del aire en la ciudad de Tarija en puntos de muestreo de red MoniCA. *Revista Acta Nova*, vol. 8 no 3.

Recuperado de:

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892018000100004)

[07892018000100004](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892018000100004)

Orellana, M. (2006). Estado de conocimiento de los Briozoos dulceacuícolas de Chile.

Gayana (Concepc.), vol.70 no.1. Recuperado de: [http://dx.doi.org/10.4067/S0717-](http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382006000100015)

[65382006000100015](http://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382006000100015)

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura de la Salud y la Alimentación.

(1999). Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias comité del Codex sobre higiene de los alimentos. *Organización mundial*, 39(06)5705.4593.

Recuperado de:

http://www.fao.org/tempref/codex/Meetings/CCFH/ccfh32/FH99_11s.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2020). OMS estima que 7 millones de muertes ocurren cada año debido a la contaminación atmosférica. Recuperado de:

[https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9406:2014-7-](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9406:2014-7-million-deaths-annually-linked-air-pollution&Itemid=135&lang=es)
[million-deaths-annually-linked-air-pollution&Itemid=135&lang=es](https://www.paho.org/hq/index.php?option=com_content&view=article&id=9406:2014-7-million-deaths-annually-linked-air-pollution&Itemid=135&lang=es)

Organización Panamericana de la Salud – OPS. (2018). Plomo. Recuperado de:

<https://www.paho.org/es/temas/seguridad-quimica/plomo>

Ortíz, R & Cram, S. (2012). Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en suelos de la llanura aluvial baja del estado de Tabasco, México. *Universidad y ciencia*, vol.28 no.2 Villahermosa. Recuperado de:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-29792012000200003

Osorio, J & Molina, L. (2009). A vuelo de pájaro: las ciudades como refugio para las aves.

Recuperado de: <http://revistas.uan.edu.co/index.php/nodo/article/view/123/0>

Ospina, N & Peña, E. (2004). Alternativas de Monitoreo de Calidad de Aguas: Algas como Bioindicadores. Recuperado de:

<https://www.semanticscholar.org/paper/Alternativas-de-Monitoreo-de-Calidad-de-Aguas%3A-como-%C3%81lvarez-Enrique/2a351d344e33a94889b95e74c13ca443d8d682d9>

Otero, M., Torres, N., Plaza, G & Pérez, B. (2002). Nematodos bacteriófagos como bioindicadores y como organismos asociados a los procesos de biorremediación.

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, 6; 1; 12-2002; 675-679.

Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11336/45517>

Paggi, A. (1999). Los Chironomidae como indicadores de calidad de ambientes dulceacuícolas. Recuperado de:

<https://www.researchgate.net/publication/287493777>

- Paggi, A. (2003). Los quironómidos (diptera) y su empleo como bioindicadores. Instituto de Limnología “Dr. Raúl A. Ringuelet”. *Revista Biología Acuática*, núm. 21. Recuperado de: <https://revistas.unlp.edu.ar/bacuatica/article/view/6803>
- Palacios, J. (2014). Biodiversidad de Collembola (Hexapoda: Entognatha) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, Supl. 85: S220-S23. Recuperado de: <https://doi.org/10.7550/rmb.32713>
- Parra, E. (2014). Aves silvestres como bioindicadores de contaminación ambiental y metales pesados. *CES Salud Pública* 5:59-69. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4804774.pdf>
- Peláez, D., Guzmán, B., Rodríguez, J., Acero, F & Nava, G. (2016). Presencia de virus entéricos en muestras de agua para el consumo humano en Colombia: desafíos de los sistemas de abastecimiento. *Biomédica*, 36(Supl.2):169-78. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/bio/v36s2/v36s2a18.pdf>
- Peña, E., Palacios, M & Ospina, N. (2005). Algas como bioindicadores de la contaminación. Recuperado de: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=14QBTq77BsIC&oi=fnd&pg=PA3&dq=algas+bioindicadoras+de+la+calidad+del+agua&ots=JYEuHmloe8&sig=fJKLG4m2i2RxYma7vgYkIKhSpu8#v=onepage&q=algas%20bioindicadoras%20de%20la%20calidad%20del%20agua&f=false>
- Pérez, A & Garrido, J. (2008). Evaluación del estado de conservación de una zona LIC (Gándaras de Budino, Red Natura 2000) usando los coleópteros acuáticos como

- indicadores. *Departamento de Ecología y Biología Animal, Facultad de Biología, Universidad de Vigo*, 36310, Vigo (España). Recuperado de:
<https://ddd.uab.cat/pub/limnetica/02138409v28n1/02138409v28n1p11.pdf>
- Pirez, M & Mota, M. (2013). Morfología y estructura bacteriana. Recuperado de:
<http://www.higiene.edu.uy/cefa/2008/MorfologiayEstructuraBacteriana.pdf>
- Polanía, J. (2010). Indicadores biológicos para el monitoreo de puertos en Colombia. *Gestión y Ambiente*, Vol. 13 Núm. 3. Recuperado de:
<https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/25417>
- Pontón, J. (2008). La pared celular de los hongos y el mecanismo de acción de la anidulafungina. *Revista Iberoamericana de Micología*, 25: 78-82. Recuperado de:
<http://www.reviberoammicol.com/2008-25.p/078082.pdf>
- Privadi, T., Raffiudin, R y Harahap, I. (2011). Termites community as environmental bioindicators in highlands: a case study in eastern slopes of Mount Slamet, Central Java. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*. Recuperado de:
<https://www.researchgate.net/publication/267711000>
- Puig, A. (2020). Bioindicadores (indicadores biológicos). Recuperado de:
<https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal/enciclopedia/terminos/Bioindic.htm>
- Pujante, A. (1997). Los artrópodos como bioindicadores de la calidad de las aguas. *Bol. S. E.A.*, N° 20: 277-284. Recuperado de: http://sea-entomologia.org/PDF/BOLETIN_20/B20-024-277.pdf

- Querubín, L y Vázquez, M. (2012). Colémbolos (Hexapoda: Collembola): pequeños artrópodos abundantes y diversos en Quintana Roo, México. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/21f8/f7d0ebcc9390a9df0eab7cfcb0e31395492d.pdf>
- Quispe, K., Ñique, M & Chiquilín, E. (2015). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en la ciudad de Tingo María, Perú. *Investigación y Amazonía*, 3 (2): 99-104. Recuperado de: <http://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/90/74>
- Ramírez, A. (2018). Taxonomía, ecología y liquenogeografía. *The Biologist (Lima)*. Recuperado de: <http://revistas.unfv.edu.pe/index.php/rtb/article/view/224/218>
- Ramírez, K., Morales, C., Ospino, J & Jiménez, J. (2017). Líquenes: cuando la unión hace la fuerza. *Boletín InfoFlora*, Vol. 2. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/335463507_Boletin_InfoFlora_Vol_2_-_Liquenes_cuando_la_union_hace_la_fuerza
- Ramírez, R. (2010). Moluscos gasterópodos como bioindicadores en el Archipiélago canario: de procesos naturales a causas antropogénicas. *Biología animal (zoología)*. Recuperado de: <https://accedacris.ulpgc.es/handle/10553/3958>
- Ramos, E., Nuñez, H & Cresaa, C. (2013). Insectos acuáticos como indicadores de la calidad del agua: una representación semántica basada en ontologías. *Acta Biológica Venezuelica*, Vol. 33(1-2): 93-110. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/267752039>

Red Ambiental de Asturias. (2019). Compuestos Orgánicos Volátiles (COV). Recuperado de:

<http://movil.asturias.es/portal/site/medioambiente/menuitem.1340904a2df84e62fe47421ca6108a0c/?vgnnextoid=00e8e54f41639210VgnVCM10000097030a0aRCRD&vgnnextchannel=032ab1cc11b6a110VgnVCM1000006a01a8c0RCRD&i18n.http.lang=es>

Rey, F & Ceña, R. (2006). Edificios saludables para trabajadores sanos: calidad de ambientes interiores. *Junta de castillo y león*. Recuperado de:

<https://www.fessegovia.es/wp-content/uploads/2018/09/Edificios-saludables.pdf>

Reyes, H. (2018). Factores bióticos de la contaminación del agua de consumo humano en la universidad de Santander Udes Cúcuta 2018 b. Recuperado de:

<https://repositorio.udes.edu.co/bitstream/001/4145/1/FACTORES%20BIOTICOS%20DE%20LA%20CONTAMINACION%20DEL%20AGUA%20DE%20CONSUMO%20HUMANO%20EN%20LA%20UNIVERSIDAD%20DE%20SANTANDER%20U.pdf>

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, E., Díaz, M & González, E. (2016). Heavy metals Contamination: implications for health and food safety. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, Vol. 16 N° 2. Recuperado de:

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6096110.pdf>

Ríos, S., Agudelo, R & Gutiérrez, L. (2017). Patógenos e indicadores microbiológicos de calidad del agua para consumo humano. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 35(2): 236-

247 Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v35n2/0120-386X-rfnsp-35-02-00236.pdf>

Ríos, S., Agudelo, R & Gutiérrez, L. (2017). Pathogens and microbiological indicators of the quality of water for human consumption. *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, 2017; 35(2): 236-247. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v35n2/0120-386X-rfnsp-35-02-00236.pdf>

Rivero, m., Elías, R & Vallarino, E. (2005). First survey of macroinfauna in the Mar del Plata Harbor (Argentina), and the use of polychaetes as pollution indicators. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 40(2): 101-108. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-19572005000200002>

Rodríguez, C. (2000). Actualización sobre hepatitis viral: etiología, patogenia, diagnóstico microbiológico y prevención. *Revista Cubana Med. Gen. Integr.*, v.16 n. 6. Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21252000000600009

Rodríguez, J. (2004). Respuesta de los poliquetos bentónicos a la variabilidad ambiental y condiciones El Niño en Bahía Petacalco (Guerrero, México). *Cienc. Mar*, vol.30 no.4. Recuperado de: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-38802004000500002&script=sci_arttext&tlng=en

Rodríguez, J., Gonzáles, J., Magarolas, R & Martínez, C. (2011). The air belongs to us: the importance of maintaining air quality. *Archivos de Bronconeumología*, Volume 47,

Supplement 1. Recuperado de:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0300289611700072>

Roldán, G. (2012). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. Recuperado de:

https://www.academia.edu/15459713/Los_Macroinvertebrados_omo_Bioindicadores_de_la_Calidad_Del_Agua

Roldán, G. (2016). Los macro invertebrados como bioindicadores de la calidad del agua:

cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista De La*

Academia Colombiana De Ciencias Exactas, Físicas Y Naturales, 40 (155), 254-

274. Recuperado de: <http://www.raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/335>

Romano, L. (1999). Bioindicadores de Contaminación Acuática en Peces. *Revista*

AquaTIC, núm. 53. Recuperado de:

<http://revistaaquatic.com/ojs/index.php/aquatic/article/view/53>

Romero, C., Castañeda, D & Acosta, G. (2016). Determinación de la calidad bacteriológica

del aire en un laboratorio de microbiología en la Universidad Distrital Francisco

José de Caldas en Bogotá, Colombia. *NOVA*, 13 (26): 129-137. Recuperado de:

<http://www.scielo.org.co/pdf/nova/v14n26/v14n26a12.pdf>

Romero, M. (2001). Bibliografía tesis. Recuperado de:

<http://mgpa.forestaluchile.cl/Tesis/Romero%20Marisol.pdf>

Romero, M., Olite, F & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana Higiene Epidemiológica*, v.44 n.2.

Recuperado de: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=s1561-30032006000200008&script=sci_arttext

Rondón, S., Artunduaga, f., Ramírez, R., Quiroz, J & Leiva, E. (2011). The Macroinvertebrates as Indicators of the Quality of Soil in Blackberry, Grass and Avocado Crops. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*, 64(1):5793-5802. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v64n1/a05v64n01.pdf>

Ropero, J. (2016). Aves. Recuperado de:

<https://ecojugando.files.wordpress.com/2016/07/quc3a9-son-las-aves-cc3b3mo-son-las-aves.pdf>

Rosas, J., Rosas, A., Sánchez, A., Muñoz, R & Sarabia, V. (2012). Insectos como bioindicadores de la calidad del agua en el arroyo “Ayacucho”, tramo parque nacional el veladero colonia Simón Bolívar, Acapulco de Juárez, Guerrero. Recuperado de: <http://www.entomologia.socmexent.org/revista/2013/EUL/1292-1296.pdf>

Salas, A., Achinelly, M., Chávez, E & Camino, N. (2015). Estudio de la diversidad de nematodos asociados al sustrato como indicadores de la calidad del suelo en agro ecosistemas. *Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales*, 978-950-34-1265-7. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/56504>

Sanabria, A. (2018). Protozoos de vida libre en Colombia: un análisis de la importancia en las ciencias limnológicas. Recuperado de:

<http://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/14964>

Sánchez, A. (2018). Factores que reducen la población de abejas (*Apis mellifera*) en zonas tropicales: una revisión. Recuperado de:

<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17821/S%C3%81NCHEZ%20TOVAR%20ANG%C3%89LICA%202018.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Sánchez, A., Granados, D., López, G & Hernández, M. (2003). Ecología de las plantas epífitas. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente*, Vol. 9, N 2.

Recuperado de: http://www.oikos.unam.mx/LECT/images/publicaciones-2000/mmr_estudios_1994.pdf

Sánchez, M., González T., Ayora, T., Martínez, E & López, P. (2018). Qué son los microbios. *Ciencia*. Recuperado de:

https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/images/revista/68_2/PDF/QueSonMicrobios.pdf

Sánchez, S y Talavera, M. (2013). Los nematodos como indicadores ambientales en Agroecosistemas. *Revista Científica de Ecología y Medio ambiente*, vol. 22 núm. 1.

Recuperado de:

<https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/765>

Santoni, C & Lijteroff, R. (2006). Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de bioindicadores en la provincia de san Luis, argentina. *Revista internacional de*

contaminación ambiental. Recuperado de:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-49992006000100049&script=sci_abstract

Sarmiento, D. (2013). Evaluación de la contaminación por metales pesados en muestras de musgo recolectadas durante el período febrero – marzo 2011 en la Estación Antártica Ecuatoriana Pedro Vicente Maldonado. Recuperado de:

<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/2114/1/T-UCE-0008-05.pdf>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2011). Red de Monitoreo de calidad del aire de Bogotá – RMCAB. Recuperado de:

<https://www.car.gov.co/uploads/files/5b8d40ca015b9.pdf>

Segat, J. Corá, Figueredo Vasconcellos, R. Leandro, Pasiva Silva, D., Vareta, D., & Cardoso, E. Jurando Bran Nogueira. (2017). Ants as indicators of soil quality in an on-going recovery of riparian forests. *Forest ecology and management*, 404, 338-343. Recuperado de: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/5824763>

Senatore, S & Borzino, D. (2014). “Los líquenes detectores de la contaminación atmosférica”. Un alga y un hongo, se necesitan para crear esta maravilla de la naturaleza. *Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación*, ISBN: 978-84-7666-210-6 – Artículo 86. Recuperado de:

<https://www.oei.es/historico/congreso2014/memoriactei/86.pdf>

SEObirdlife. (2013). Las aves son un indicador de calidad de vida y un espectáculo natural.

Recuperado de: <https://www.seo.org/2013/10/28/las-aves-son-un-indicador-de-calidad-de-vida-y-un-espectaculo-natural/>.

Serrano, A. (2008). La nutrición de las plantas. Recuperado de:

<https://silo.tips/download/la-nutricion-de-las-plantas>

Serrano, Y. (1992). Estudio poblacional de los musgos de diferentes sectores con alteración ecológica en el municipio de Bayamón, Puerto Rico. Recuperado de:

<https://eprints.ucm.es/52077/1/530606343X.pdf>

Sieklicki, J., Pires, N., Oliveira, P., Fernandes, V & Geronazzo, K. (2019). Rev. Ambient.

Ague vol.14 no.2 Taubate. Relationships between land use and water quality obtained for the evaluation of genotoxic effects in plant bioindicators. *Revista Ambiental Agua*, vol.14 no.2 Recuperado de:

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1980-993X2019000200312&lang=es

Silva, C & Vinuesa, P. (2008). Capítulo 11: Ecología evolutiva de bacterias y el concepto de especie el caso de los rizobios. Recuperado de:

<https://micrositios.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/530/cap11.pdf>

Simijaca, D., Vargas & Morales, M. (2014). Uso de organismos vegetales no vasculares como indicadores de contaminación atmosférica urbana (Tunja, Boyacá, Colombia). *Acta biológica Colombiana*, vol.19 no.2. Recuperado de:

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-548X2014000200010&lang=es

Simioni, D. (2003). Contaminación atmosférica y conciencia ciudadana. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*. Recuperado de:
https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/2351/1/S02121026_es.pdf

Simó, M., Laborda, A., Jorge, C & Castro, M. (2010). Las arañas en agroecosistemas: bioindicadores terrestres de calidad ambiental. *Revista del laboratorio tecnológico del Uruguay*, No. 6 - 2011 - INNOTECH – 51. Recuperado de:
<https://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTECH/article/view/135/90>

Soares, M., Garlet, J & Spiller, C. (2017). Arthropod bioindicators of environmental quality. Recuperado de:
https://www.researchgate.net/publication/327784864_Arthropod_bioindicators_of_environmental_quality

Soci, J. (2018). Bioindicators of the quality of the soil of thickets and open vineyards. *Sol Sci. Plan Nutra*, vol.18 no.4. Recuperado de:
https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-95162018005003002&lng=en&nrm=iso&tlng=en

Soriano, M., Bejar, V & Bonilla, P. (2002). Frecuencia de hongos anemófilos productores de micotoxinas en algunos mercados de Lima, detección de patulina en manzanas en descomposición. *Ciencia e investigación*, 5(2), 36-45. Recuperado de:
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/farma/article/view/3407>

- Stamenković, S., Cvijan, M & Arandelović, M. (2010). Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en Dimitrovgrad (sudeste de Serbia). *Archives of Biological Sciences*, Vol 62, N 3. Recuperado de: <https://doi.org/10.2298/ABS1003643S>
- Storaci, k., Fernández, R & Smith, G. (2013). Evaluación de la calidad del agua del río Cúpira (La cumana, Estado Carabobo, Venezuela) mediante bioindicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos. *Asociación Interciencia*, Vol. 38, núm. 7. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33928556002.pdf>
- Tapia, L., Sánchez, T., Bailón, M., Jara, E., Arteaga, C., Macedo, D., Salvatierra, A. (2018). Invertebrados bentónicos como bioindicadores de calidad de agua en lagunas altoandinas del Perú. *Ecología Aplicada*, 17(2). Recuperado de: <http://www.scielo.org.pe/pdf/ecol/v17n2/a16v17n2.pdf>
- Téllez, J., Rodríguez, A & Fajardo, A. (2006). Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental. *Revista salud pública*. 8 (1): 108-117. Recuperado de: <https://www.scielosp.org/pdf/rsap/2006.v8n1/108-117/es>
- Temmerman, L., Nigel, J., Pierre, J., Klumpp, A., Krause, G & Tonneijck, A. (2001). Biomonitorio de contaminantes del aire con plantas - Consideraciones para el futuro. *Urban Air Pollution, bioindication and Environmental Awareness*. Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/40798218>
- Toledo, V., Hernández, D., Urbina, C & Creazzola, F. (2016). Primeros datos de bioacumulación de metales pesados en briofitas. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6587925.pdf>

Trivedi, P., Delgado, M., Anderson, I., & Singh, B. (2016). Response of Soil Properties and Microbial Communities to Agriculture: Implications for Primary Productivity and Soil Health Indicators. Recuperado de:

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2016.00990/full>

Vaillant, D. (2014). Los líquenes, una alternativa para el control de Fito patógenos.

Fitosanidad, Vol 18 N 1. Recuperado de:

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209131412009>

Valentín, N., Muro, C & Montero, J. (2010). Métodos y técnicas para evaluar la calidad del aire en museos: Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía. Recuperado de:

https://www.museoreinasofia.es/sites/default/files/actividades/programas/metodos_y_tecnicas_restauracion.pdf

Vallés, M., Fuentes, E & Pons, J. (2018). El plomo: un problema medioambiental y para la salud. Recuperado de: [https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/el-plomo-un-problema-medioambiental-y-para-la-salud-](https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/el-plomo-un-problema-medioambiental-y-para-la-salud-1345680342040.html?noticiaid=1345777559254)

[1345680342040.html?noticiaid=1345777559254](https://www.uab.cat/web/detalle-noticia/el-plomo-un-problema-medioambiental-y-para-la-salud-1345680342040.html?noticiaid=1345777559254)

Vargas, A., Calderón, S., Sánchez, M., Álvarez, A., Romero, G., Riveros, L & Cantor, Y. (2018). Departamento Nacional de Planeación (DNP). Valoración económica de la degradación ambiental en Colombia 2015. Recuperado de:

<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Valoraci%C3%B3n%20econ%C3%B3mica%20de%20la%20degradaci%C3%B3n%20ambiental.pdf>

- Velázquez, E & Vega, M. (2004). Los peces como indicadores del estado de salud de los ecosistemas acuáticos. CONABIO. *Biodiversitas* 57: 12-15. Recuperado de: <https://www.biodiversidad.gob.mx/Biodiversitas/Articulos/biodiv57art3.pdf>
- Venuste, N., Beth, K. A, Frederic, F., Lombart, K. M Maurice, Wouter, D. & Donat, N. (2018). Uso de hormigas del suelo y de la hojarasca (Hymenoptera: Formicidae) como indicadores biológicos de la calidad del suelo bajo diferentes usos de la tierra en el sur de Ruanda. *Entomología ambiental*, 47, 1394-140. Recuperado de: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/6734778>
- Verzero, F., Sgarbi, C., Culebra, S & Ricci, M. (2014). Grupos funcionales dominantes de hormigas (Hymenoptera: Formicidae) en pastizales naturales con y sin pastoreo del noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, Vol 113 (2): 107-113. Recuperado de: <http://revista.agro.unlp.edu.ar/index.php/revagro/article/view/134>
- Vilchez, M. (2018). Contaminación fúngica ambiental en las líneas de transporte público urbano de la ciudad de Ayacucho, 2017. Recuperado de: http://repositorio.unsch.edu.pe/bitstream/handle/UNSCH/2854/TESIS%20B853_Vil.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Villegas, M & Garitano, A. (2008). Las comunidades de aves como indicadores ecológicos para programas de monitoreo ambiental en la ciudad de La Paz, Bolivia. Recuperado de: <http://ecologiaenbolivia.com/documents/Villegas432.pdf>

- Vukovi, G., Anicic, M., Tomašević, M., Samson, R & Popovic, A. (2014). Monitoreo biomagnético de la contaminación del aire urbano utilizando bolsas de musgo. Recuperado de:
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/072/49072149.pdf
- Will, S., Jovan, S & Amacher, M. (2017). Lichen elemental content bioindicators for air quality in upper Midwest, USA: A model for large-scale monitoring. *Ecological Indicators*, 78, 253–263. Recuperado de:
https://www.fs.fed.us/pnw/pubs/journals/pnw_2017_will-wolf002.pdf
- Wolińska, A., Kuźniar, A., Szafranek, A., Jastrzębska, N., Roguska, E & Stępniewska, Z. (2016). Biological Activity of Autochthonic Bacterial Community in Oil-Contaminated Soil. *Water Air Soil Pollut*, 227: 130. Recuperado de:
https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4820484/pdf/11270_2016_Article_2825.pdf
- Yatawara, M & Dayananda, N. (2019). Biblioteca Nacional de Medicina. Uso de líquenes cortícolas para la evaluación de la calidad del aire ambiente a lo largo de ecosistemas rurales-urbanos de los trópicos: un estudio en Sri Lanka. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30796607?dopt=AbstractPlus>
- Zaconeta, F. (2000). Identificación de plantas locales como indicadoras de calidad de suelos en parcelas agrícolas, en la microcuenca Luquigüe, Yoro, Honduras. Recuperado de: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2891/1/IAD-2000-T017.pdf>

- Zaconeta, F. (2000). Identificación de plantas locales como indicadoras de calidad de suelos en parcelas agrícolas, en la microcuenca Luquigüe, Yoro, Honduras. Recuperado de: <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/2891/1/IAD-2000-T017.pdf>
- Zamudio, A. (2017). Evaluación de residuos de plaguicidas y metales tóxicos en miel de abejas producida en zonas de cultivos de fresa y cítricos. *Universidad Nacional de Colombia*. Recuperado de: <http://bdigital.unal.edu.co/57194/7/Adriana%20M.ZamudioS%C3%A1nchez.2017.pdf>
- Zanabria, M & Moiso, P. (2007). Preferencias por los recursos y abundancia de *Tillandsia aeranthos* y *Tillandsia recurvata* en la ciudad de la Plata. Recuperado de: <https://www.fcnym.unlp.edu.ar/catedras/ecopoblaciones/TP/Proyecto%2007%20Tillandsia%20Zanabria%20Moiso.pdf>
- Zepeda, C., Ávila, P., Díaz, U., Alanís, Y., Zarazúa, G & Amaya, A. (2014). Diversidad de musgos epifitos de la zona metropolitana del valle de Toluca, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 85: 108-124. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/425/42531046007.pdf>
- Zuhro, Z., Suheriyanto, D., Farah, I & Maulidiyah, A. (2019). The potential of soil arthropods as bioindicator of soil quality in relation to environmental factors at apple farm, Batu, East Java, Indonesia. *IOP Conf. Series: Journal of Physics* 1217.

Recuperado de: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1217/1/012180/pdf>