



Universidad **César Vallejo**

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Revisión Sistemática. Líquenes Epífitos como Bioindicadores
eficientes y adaptables de la Calidad del Aire**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
Ingeniero Ambiental

AUTOR:

Timoteo Cornejo, Gian Carlos Heberd (ORCID: 0000-0002-2408-2835)

ASESOR:

Mg. Ugarte Alván, Carlos Alfredo (ORCID: 0000-0001-6017-1192)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Gestión de Riesgos y Adaptación al Cambio Climático

LIMA – PERÚ

2022

Dedicatoria

La presente tesis la dedico a las personas que hicieron posible este trabajo, que son motivo de felicidad en mi vida, mi esposa, mi madre, mi abuela, mis hermanos, mis mascotas.

Agradecimiento

Agradezco a las personas que me dieron el empuje para poder realizar esta tesis. A mi abuelo que me mira desde el cielo y que me permitió forjar el corazón y los valores que tengo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA.....	i
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
ÍNDICE DE TABLAS.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	4
III. METODOLOGÍA.....	41
3.1. Tipo y diseño de investigación.....	41
3.2. Escenario de estudio.....	41
3.3. Participantes.....	41
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	41
3.5. Procedimiento.....	41
3.6. Categorías, subcategorías y matriz de categorización.....	43
3.7. Aspectos éticos.....	43
3.8. Rigor científico.....	43
3.9. Método de análisis de datos.....	43
IV. RESULTADOS.....	44
V. CONCLUSIONES.....	57
VI. RECOMENDACIONES.....	58
REFERENCIAS.....	59
ANEXOS.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes considerados de Estudios con líquenes como bioindicadores en el Perú.	4
Tabla 2. Antecedentes considerados de Estudios Internacionales con Líquenes como Bioindicadores.	6
Tabla 3. Definiciones de términos en el tema de bioindicadores.	21
Tabla 4. Clasificación de Índice IPA	29
Tabla 5. Rasgos y categorías funcionales de líquenes.....	30
Tabla 6. Matriz Apriorística.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1. Talo heterómero, vista trasversal de <i>Sticta Aff. Weigeli</i>	20
Figura. 2. Procedimiento de muestreo.....	27
Figura. 3. <i>Xanthoria parietina</i>	35
Figura. 4. Muestreadores HSRS junto a Liquen <i>Evania prunastri</i>	37
Figura. 5. Procedimiento de recolección de datos	42
Figura. 6. Mapa de Isocontaminación de valores IPA.....	45
Figura. 7. Comparación de las mediciones de Mo, Cr y Cu de líquenes y muestreadores HSRS	53

RESUMEN

La contaminación atmosférica es una de las consecuencias de todas las actividades que el hombre ejerce para poder desarrollarse, esta contaminación afecta la salud dependiendo su intensidad y los elementos que la constituyen, esta situación amerita el constante monitoreo de la calidad del aire, en ese sentido los líquenes están considerados como eficientes bioindicadores de la contaminación atmosférica, al estar estrechamente ligados por tener como fuente principal de nutrientes a los elementos atmosféricos, esta característica los hace ser ideales para poder ser sensores activos y pasivos de la contaminación atmosférica, el costo y la relativa simpleza de su uso como indicadores los hace ser complementos ideales para los indicadores convencionales, que son costosos y poseen limitaciones en sus instalaciones. El presente trabajo consta de la investigación en forma de revisión sistemática haciendo uso principalmente de la base de datos ScienceDirect, teniendo como enfoque de investigación la antigüedad del artículo científico y el interés de la investigación que es el empleo de líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Se determinaron las técnicas de monitoreo, los parámetros que demuestran perturbación ambiental y la adaptabilidad a los entornos para los cuales son utilizados.

Palabras clave: Líquenes, Bioindicadores, Contaminación atmosférica.

ABSTRACT

Air pollution is one of the consequences of all the activities that man exerts to be able to develop.

This pollution affects health depending on its intensity and the elements that constitute it, this situation merits constant monitoring of air quality, in that sense the lichens are considered as efficient bioindicators of air pollution, being closely linked to atmospheric elements as the main source of nutrients, this makes them ideal for being active and passive sensors of air pollution, the cost and relative simplicity of their use as indicators makes them ideal complements for conventional indicators which are costly and have limitations in their facilities. The present work consists of research in the form of a systematic review using mainly the ScienceDirect database, having as a research approach the age of the scientific article and the interest of the research that is the use of lichens as bioindicators of air quality. We determined the monitoring techniques, the parameters that demonstrate environmental disturbance and adaptability to the environments for which they are used.

Keywords: Lichens, Bioindicators, Atmospheric pollution

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire se ha clasificado como carcinógeno del grupo 1 por La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), lo que quiere decir que es tóxico y cancerígeno para los seres humanos, lo que subraya lo importante que es para la salud pública la calidad del aire. (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021)

Las áreas metropolitanas, son a menudo áreas de concentración de fábricas industriales, plantas de energía y calor, instalaciones locales de calefacción, zonas de elevado tráfico vehicular, las cuales forman parte integral de su funcionamiento. (ROLA, Kaja; OSYCZKA, Piotr, 2019)

A pesar del resultado de este método de gestión de residuos, el vertido de desechos está estrechamente ligado a efectos adversos en el ambiente y por ende en la salud pública esta práctica sigue siendo un método de gestión de residuos más usado en todo el mundo. La generación de residuos está creciendo en todo el mundo, la producción de desechos municipales per cápita aumento de forma significativa en la UE en las últimas décadas. (PAOLI, Luca, et al, 2018)

El proceso de Urbanización, ha transformado radicalmente las características de áreas naturales, la pérdida de biodiversidad, la contaminación del aire, el cambio climático producto del establecimiento y crecimiento urbano, son resultados del impacto que tiene en el planeta. Gran parte de los paisajes naturales del mundo han sido transformados para uso humano. (LUCHETA, Fabiane, et al, 2019)

La importancia de monitorear la calidad ambiental del aire debido a las consecuencias de la contaminación y su exposición al ser humano, ayuda a la implementación de políticas ambientales que controlan y minimizan la contaminación. Es ampliamente conocido y aceptado el uso de organismos vivos para monitorear la perturbación ambiental. (PAOLI, Luca, et al, 2018)

La evaluación de la contaminación atmosférica tiene como limitante lo complejo y costoso que es, aquí es donde el biomonitoreo es una técnica de apoyo útil, que se usa con frecuencia para monitorear por ejemplo la deposición atmosférica - producto

de la perturbación atmosférica – en varios entornos: por ejemplo, boscosos, rurales y urbanas. (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021)

Los líquenes son cada vez más utilizados como biomonitores, ya que presentan ventajas sobre los sistemas de monitoreo convencionales, que son costosos, requieren mantenimiento y su transporte puede impedir su implantación en zonas de difícil acceso. Existen estudios donde el uso de líquenes como bioindicadores revelan el impacto biológico de la contaminación del aire producido por estrategias de gestión de residuos como la incineración de residuos vertedero o el compostaje industrial. Y el número de aplicaciones usando a líquenes como bioindicadores sigue en aumento. (CORREA-OCHOA, Mauricio Andres, et al, 2020)

Cabe indicar, que los líquenes son cosmopolitas, están distribuido en todo el planeta y reflejan la influencia de condiciones ambientales en los seres vivos. Además, la aplicación de líquenes como bioindicadores se consideran sencillas y baratas, en comparación con los sistemas convencionales que son complejos, costosos y se limitan al rastreo de ciertos contaminantes (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019)

De esta manera, y teniendo en cuenta la problemática mencionada, se expone la siguiente cuestión como problema general:

¿Son los líquenes eficientes bioindicadores de la calidad ambiental adaptables a diferentes entornos?

Del cual desgloso como problemas específicos:

P1: ¿Qué técnicas de biomonitoreo utilizando Líquenes podemos aplicar?

P2: ¿Qué parámetros de medición podemos analizar usando líquenes como bioindicadores?

P3: ¿El biomonitoreo con líquenes es un método adaptable a diferentes entornos?

De tal forma se consideró el Objetivo General:

Evaluar la eficiencia y adaptabilidad de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire.

Y como objetivos específicos:

O1 : Identificar las técnicas de biomonitoreo utilizando Líquenes.

O2 : Identificar que parámetros de medición evidencian perturbación en el entorno.

O3:. Evaluar la adaptabilidad del biomonitoreo con líquenes a diferentes entornos.

El uso de líquenes trasplantados como biomonitores de las concentraciones de elementos atmosféricos permite la construcción de redes de monitoreo extensas, densas y de bajo costo, además acumulan gran variedad de contaminantes producto la presión antropogénica, su sensibilidad y tolerancia los convierte en una herramienta verdaderamente útil para analizar la calidad ambiental. (VANNINI et al., 2017).

II. MARCO TEÓRICO

Como antecedentes existen estudios acerca del uso de líquenes como bioindicadores en Perú, la cantidad de estudios son pocos, incluso en Latinoamérica, a diferencia de países europeos, y del norte de América, donde incluso existe respaldo científico de los gobiernos del país para el uso de los líquenes como bioindicadores de la calidad ambiental. Los estudios nacionales se ubican en la tabla 1 y los artículos internacionales considerados en la tabla 2.

Los líquenes son organismos simbióticos, son una alianza entre hongos (micobionte) y algas o cianobacterias (fotobionte), que en el entorno funcionan como unidad, de manera particular, los tejidos del micobionte rodea al fotobionte y es aquí donde se establece la forma de crecimiento del líquen: en forma de costra en forma de costra (crustáceo), en forma de hoja (foliáceo), o de diminuto arbusto (fruticuloso). En el líquen, el fotobionte (alga, cianobacterias), este último es el que sintetiza los azúcares necesarios para el metabolismo, liberando oxígeno en el proceso, y el micobionte genera la estructura protectora del sistema. Producto de esta relación simbiótica se originan los Talos Liqueñicos (parte vegetativa del líquen), con anatomía, morfología, fisiología estables y específicas. (ROLA, Kaja, 2019)

Tabla 1. Antecedentes considerados de Estudios con líquenes como bioindicadores en el Perú.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
QUISPE, Katherine; ÑIQUE, Manuel; CHUQUILIN, Edilberto 2018	Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire de Tingo María, Perú.	Uso de líquenes nativos/ Cálculo de Índice de Pureza Atmosférica IPA	Se correlacionó el IPA con el flujo vehicular de una zona urbana.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
VALDIVIA, Diego; RAMÍREZ, Ángel, 2018	Uso de Líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en el pasivo ambiental Minero Santo Toribio, Ancash, Perú.	Uso de líquenes nativos/ Cálculo de IPA, complementado con Bioacumulación	Cálculo de IPA para cada estación de muestreo. Y se compararon datos de una estación de control no contaminada, con la estación de pasivo ambiental.
ARROYO SÁNCHEZ, José Antonio, 2022.	Los líquenes como bioindicadores de presencia de metales pesados en ecosistemas de montaña: experiencia en la Cordillera Blanca, Ancash-Perú	Uso de líquenes nativos/ Bioacumulación de metales en líquenes y diversidad líquénica	Evaluación de variación de liquenobiota entre sitios de estudio y se analizó la acumulación de metales entre los líquenes de mayor presencia en cada sitio de estudio. Se analizó la influencia del suelo en la acumulación de metales en los líquenes identificados.
TOVAR, Doraliza; AGUINAGA, Rafael. , 1994,	Los líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica, en Lima Metropolitana	Uso de líquenes nativos/ Diversidad Liguénica	Evaluación del grado de contaminación de zonas urbanas con la presencia o ausencia de especies liquénicas.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Antecedentes considerados de Estudios Internacionales con Líquenes como Bioindicadores.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
BOONPENG, Chaiwat, et al, 2018	Assessing atmospheric pollution in a petrochemical industrial district using a lichen-air quality index (LiAQI) - Thailand	Trasplante de Líquenes / Índice de Calidad del aire usando respuestas químicas y fisiológicas de líquenes.	Se desarrollo un Índice de Calidad del aire usando mediciones de elementos químicos y respuestas fisiológicas de líquenes trasplantados de <i>Parmotrema tictorum</i> a un polígono industrial petroquímico, a una zona agrícola aledaña y a un parque natural, este índice señaló de forma acertada la calidad del aire de cada sitio medido, encontrando que la calidad del aire mejoraba con una mayor distancia del complejo industrial.
LUCHETA, Fabiane, et al, 2019	Lichens as indicators of environmental quality in southern Brazil: An integrative approach based on community composition and functional parameters	Uso de Líquenes nativos/ Riqueza de especies (rasgos funcionales)	Se evaluó la riqueza de especies y los patrones funcionales liquénicos a lo largo de un gradiente de urbanización, clasificando las zonas estudiadas en zonas rurales, sub urbanas y urbanas, demostrando que la urbanización tiene una fuerte influencia en las comunidades de líquenes.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
VARELA, Z., et al, 2018	Changes in epiphytic lichen diversity are associated with air particulate matter levels: the case study of urban areas in Chile.	Uso de Líquenes nativos/ Diversidad taxonómica (riqueza y abundancia de especies) y Rasgos funcionales (formas de crecimiento)	Estudio realizado en centros urbanos importantes en Chile. El uso de las métricas relacionadas a la abundancia de especies y los rasgos funcionales se relacionaron con mediciones de PM 2.5. La disminución de los parámetros mencionados se relacionó con el aumento de contaminación debido a material particulado, a la vez con el aumento de hospitalizaciones por problemas respiratorios y cardiacos.
CORREA-OCHOA, Mauricio Andres, et al, 2020.	Evaluation of the Index of Atmospheric Purity in an American tropical valley through the sampling of corticolous lichens in different phorophyte species.	Uso de Líquenes nativos / Índice de Pureza Atmosférica IPA (Diversidad de líquenes)	Las zonas urbanas estudiadas fueron dentro de la ciudad de Medellín, Colombia. El IPA se relacionó de forma positiva con la calidad del aire registrada por estaciones de monitoreo. El IPA se realizó en diferentes especies de forófitos. La cobertura de líquenes varía dependiendo el nivel de contaminación.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
GEISER, Linda H., et al, 2021	Lichen-based critical loads for deposition of nitrogen and sulfur in US forests.	Uso de líquenes nativos / Diversidad de líquenes.	Se evaluó las respuestas liquénicas enfocadas en su diversidad para establecer cargas críticas de deposición atmosférica de N y S en bosques de EE. UU. La respuesta de las comunidades liquénicas de los boques de EE. UU y de la costa de Alaska, sirvieron para identificar cargas críticas de deposición de N y S. Los Valores en o por debajo de las cargas criticas protegen a la diversidad liquénica, y a la comunidad vegetal en general de los efectos nocivos de la contaminación.
MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019.	Lichen transplants as indicators of atmospheric element concentrations: a high spatial resolution comparison with PM10 samples in a polluted area (Central Italy)	Trasplante de Líquenes / Bioacumulación	Los trasplantes de líquenes de <i>Evornia prunastri</i> se colocaron al lado de muestreadores de PM de alta resolución en una zona urbana e industrial en el centro de Italia. Se comparó la acumulación de elementos contaminantes en los trasplantes y los registros de los muestreadores, demostrando confiabilidad de las mediciones en los líquenes para componentes contaminantes emitidos en altas concentraciones.
MARIÉ, Débora C., et al, 2018.	Atmospheric pollution assessed by in situ measurement of magnetic susceptibility on lichens.	Uso de Líquenes nativos / Bioacumulación.	Se determinó la distribución de material magnético en el talo del liquen más abundante de una zona urbana con diferentes gradientes de contaminación, <i>Parmotrema pilosum</i> , en Tandil, Buenos Aires, Argentina. Se validó este procedimiento como nueva metodología para evaluar la contaminación atmosférica, este proceso es in situ y es no destructivo

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
<p>MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021.</p>	<p>Lichen transplants for high spatial resolution biomonitoring of Persistent Organic Pollutants (POPs) in a multi-source polluted area of Central Italy.</p>	<p>Trasplante de líquenes / Bioacumulación.</p>	<p>Comprendió la instalación de una red de monitoreo mediante el trasplante de <i>Evarnia prunastri</i> en una zona contaminada llamada Terni en Italia, caracterizada por fuentes de contaminación urbana e industrial. Se compararon mediciones de COPs en los líquenes con las mediciones en colectores a granel. <i>Evarnia prunastri</i> demostró ser un bioindicador eficaz para demostrar la contaminación de su entorno, las mediciones en el liquen y en el colector estuvieron estrechamente relacionadas.</p>
<p>DRESLER, Sławomir, et al, 2021</p>	<p>Allantoin content in lichens depends on anthropopressure level.</p>	<p>Trasplante de Líquenes / Bioacumulación y Procesos Fisiológicos.</p>	<p>Alantoína, compuesto ligado a procesos fisiológicos vegetales. Se analizó la interacción entre compuestos metálicos y el nivel de Alantoína en áreas con diferentes intensidades de antropopresión, a largo plazo, y la interacción de Alantoína con tensiones debido a metales, NaCl y pH bajo, esto en laboratorio, a corto plazo. Se demostró que el contenido del compuesto estudiado depende significativamente del nivel de antropopresión, Compuestos metálicos inducían a la producción de Alantoína.</p>

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
HUANG, Ying-ping, et al, 2019.	Lichen as a biomonitor for vehicular emission of metals: a risk assessment of lichen consumption by the Sichuan snub-nosed monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>)	Uso de Líquenes nativos / Bioacumulación y Procesos Fisiológicos.	Se evaluó el riesgo que tienen los Monos <i>Rhinopithecus roxellana</i> al tener como alimento a <i>Usnea aciculifera</i> y <i>Usnea luridorufa</i> . Líquenes epifitos que por sus características absorben de manera eficiente partículas como gases. Se demostró que los líquenes de sitios con alto tráfico vehicular poseían concentraciones relativamente altas de metales como Fe, Cd, Pb, Zn y Cr. La ingesta de líquenes con altas concentraciones de Cd y Pb podría afectar la salud del mamífero.
PAOLI, Luca, et al, 2018	One year of transplant: is it enough for lichens to reflect the new atmospheric conditions?	Trasplante de Líquenes / Bioacumulación y Parámetros Fisiológicos	Muestras de liquen <i>Flavoparmelia caperata</i> fueron trasladados de zonas con diferentes intensidades de contaminación aledañas a un vertedero, a una zona remota no contaminada durante 12 meses, y líquenes procedentes de la zona no contaminada se trasplantaron a zonas aledañas al vertedero, durante el mismo periodo de tiempo. Este estudio tuvo como objetivo demostrar el tiempo en que se demora un liquen en responder a los cambios de las condiciones atmosféricas. Se demostró que la recuperación no alcanzó los valores de los líquenes nativos de la zona no contaminada, mientras los líquenes expuestos a la contaminación mostraron valores iguales a los nativos de la zona contaminada.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
BENÍTEZ, Angel, et al, 2018	Functional traits of epiphytic lichens in response to forest disturbance and as predictors of total richness and diversity.	Uso de Líquenes nativos / Diversidad de líquenes y Rasgos Funcionales	Se evaluaron nueve rasgos funcionales de los líquenes en tres tipos de bosques (bosques montanos tropicales, al sur de Ecuador) según su perturbación antropogénica (bosques primarios y vegetación secundaria). Cada rasgo funcional respondió de forma positiva a los cambios estructurales de los bosques (cobertura del dosel y diámetro de los árboles). Estos grupos funcionales se proponen como indicadores complementarios del nivel de perturbación forestal y pueden usarse como medida para gestionar los bosques tropicales.
MANNINEN, Sirkku, 2018	Deriving nitrogen critical levels and loads based on the responses of acidophytic lichen communities on boreal urban Pinus sylvestris trunks.	Uso de Líquenes nativos / Diversidad de líquenes y Bioacumulación.	Estudio realizado en el área metropolitana de Helsinki, sur de Finlandia, donde la contaminación por tráfico vehicular es elevada. Existen comunidades de líquenes afectadas por la contaminación derivada de compuestos nitrogenados. Se analizó la acumulación de N y C y la frecuencia de comunidades líquénicas.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
PINHO, P., et al, 2017	Using nitrogen concentration and isotopic composition in lichens to spatially assess the relative contribution of atmospheric nitrogen sources in complex landscapes.	Uso de líquenes nativos / Bioacumulación.	Se uso a los líquenes para clasificar los tipos de cobertura terrestre, según la cantidad y la forma de Nitrógeno Reactivo. El área de estudio tiene influencia del océano, de agricultura intensiva, de emisiones urbanas e industriales. Los líquenes proporcionaron información para estimar como cada fuente de emisión impacta en los ecosistemas.
MALASPINA, P.; MODENESI, P.; GIORDANI, P, 2018	Physiological response of two varieties of the lichen <i>Pseudevernia furfuracea</i> to atmospheric pollution.	Trasplante de líquenes / Procesos Fisiológicos	En dos variedades de <i>Pseudevernia furfuracea</i> se analizaron las respuestas fisiológicas relacionadas con el aparato fotosintético del Fotobionte usando parámetros de fluorescencia. Las dos variedades tuvieron respuestas diferentes a la exposición de contaminantes, siendo la variedad <i>ceratea</i> la que demostró variabilidad en la eficiencia fotosintética desde el sitio no contaminado, pasando por el poco contaminado y por último el altamente contaminado. Siendo esta variedad la más sensible a un gradiente de contaminación. Estudio realizado en Génova, Italia.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
ZHAO, Lili, et al, 2019	Element bioaccumulation in lichens transplanted along two roads: The source and integration time of elements.	Trasplante de líquenes / Bioacumulación.	Trasplantes de <i>Flavopunctelia soledica</i> y <i>Rhizoplaca chrysoleuca</i> de un área no contaminada se trasladaron a lo largo de dos caminos en un área altamente contaminada de la ciudad de Boading y Xushui en China. La acumulación de Azufre y Metales pesados fueron analizados. Las concentraciones de los contaminantes metálicos aumentaron significativamente en los lugares de alto tráfico vehicular y las concentraciones de S aumentaron en el periodo invernal por la alta demanda de calefacción. El tiempo de integración de los contaminantes relacionados al S fueron menor a 3 meses, y los contaminantes metálicos fue mayor a 3 meses.
AGNAN, Yannick; PROBST, Anne; SÉJALON-DELMAS, Nathalie, 2017	Evaluation of lichen species resistance to atmospheric metal pollution by coupling diversity and bioaccumulation approaches: A new bioindication scale for French forested areas.	Uso de Líquenes nativos / Diversidad de líquenes y Bioacumulación.	Se evaluó la resistencia y sensibilidad a los metales mediante la combinación de enfoques basados en Diversidad Liquélica y Bioacumulación en áreas boscosas de Francia y Suiza. Utilizando esta combinación de enfoques se logró realizar una escala Sensibilidad/Resistencia a los mentales para 43 especies de líquenes, las más frecuentes de la zona.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
PIOVÁR, J., et al, 2017	Short-term influence of Cu, Zn, Ni and Cd excess on metabolism, ultrastructure and distribution of elements in lichen <i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th. Fr.	Trasplante de líquenes / Bioacumulación y Parámetros Fisiológicos	Se trasladaron muestras de <i>Xanthoria parietina</i> al laboratorio, estos fueron tratados con Cu, Zn, Ni, Cd durante 24, 48, 72 horas y se evaluó el estado de Fluorescencia e integridad de Clorofila, contenido de proteínas solubles y ergosterol, estando relacionados todos los metales y las respuestas fisiológicas. Siendo Cd el compuesto que más impacto tuvo en estas respuestas fisiológicas
KLAPSTEIN, Sara J., et al, 2020.	Spatial distribution of mercury and other potentially toxic elements using epiphytic lichens in Nova Scotia.	Uso de Líquenes nativos / Bioacumulación.	Líquenes <i>Usnea spp.</i> Se recolectaron de Nueva Escocia, Canadá y se usaron como Biomonitores de la distribución espacial de Elementos potencialmente tóxicos. Se clasificaron los elementos acumulados en los líquenes e identificaron su procedencia. No hubo una correlación entre Hg y la mayoría de metales encontrados, por lo cual es probable que este compuesto se transporte a largas distancias en forma gaseosa.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
SUJETOVIENĖ, Gintarė, et al, 2019	Metal accumulation and physiological response of the lichens transplanted near a landfill in central Lithuania.	Trasplante de líquenes / Respuesta fisiológica y Bioacumulación.	Trasplantes de <i>Evernia prunastri</i> y <i>Ramalia farinácea</i> se utilizaron para evaluar la contaminación por metales alrededor de un vertedero en el centro de Lituania. La evaluación de basó en la respuesta fisiológica de Fluorescencia de clorofila a (eficiencia fotosintética) para el fitobionte y la Peroxidación Lipídica de la membrana para el micobionte. Además, se analizaron los metales pesados acumulados en el los líquenes. Las respuestas fisiológicas se vieron afectadas al trasplantarse a la zona contaminada. Se halló que los líquenes trasplantados se enriquecieron en Cd y Mn.
SERRANO, Helena Cristina, et al, 2019.	Measuring and mapping the effectiveness of the European Air Quality Directive in reducing N and S deposition at the ecosystem level.	Uso de Líquenes nativos / Bioacumulación.	Se compararon las mediciones de contaminantes relacionadas al N y S, y la deposición de estos contaminantes en líquenes nativos, en un área industrial petroquímica, donde también se encuentran áreas boscosas, áreas de agricultura y zonas ganaderas. Este estudio se realizó para evaluar los resultados de las medidas adoptadas por la Unión Europea el 2001 para controlar las emisiones de contaminantes atmosféricos en los ecosistemas, ya que el monitoreo de estos resultados habría demostrado una reducción en las emisiones de compuestos de N y S. Se comprobó la reducción de los contaminantes relacionados al S en los líquenes en toda el área de estudio, pero para los compuestos relacionados al N, aunque se reportó una disminución

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
			en emisiones, a nivel de ecosistema no se observó, debido al incremento de prácticas agrícolas.
PARVIAINEN, Annika, et al, 2019	Lichens as a spatial record of metal air pollution in the industrialized city of Huelva (SW Spain)	Uso de Líquenes nativos / Bioacumulación.	Muestras de líquenes de <i>Xanthoria parietina</i> nativa de la ciudad del Huelva, España, se analizó su composición metálica para evaluar la contaminación. El área posee parques industriales donde existen actividades de fundición de Cobre, plantas de fertilizantes, plantas químicas, hidrocarburos. Los hallazgos del estudio señalaron que existe concentraciones de Elementos Potencialmente Tóxicos derivados de la actividad industrial en la periferia de los parques industriales, lo que implicaría riesgos para la salud de los habitantes de las zonas urbanas de Huelva aledañas a los parques industriales.
ROLA, Kaja, et al, 2019	Heavy-metal tolerance of photobiont in pioneer lichens inhabiting heavily polluted sites	Uso de Líquenes nativos / Respuestas Fisiológicas y Bioacumulación.	3 especies de líquenes nativos de un área industrial contaminada en Polonia se utilizaron para evaluar la contaminación, enfocándose en la bioacumulación de elementos metálicos y las respuestas fisiológicas de líquenes. Se encontró que los parámetros fisiológicos relacionados con la síntesis y la integridad de la clorofila mostraron valores significativamente altos en comparación con líquenes de una zona no contaminada, demostrando un funcionamiento sano del fitobionte bajo condiciones de estrés por metales, esto indica su adaptación a este entorno contaminado.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
VANNINI, Andrea, et al, 2021.	Lichens as monitors of the atmospheric deposition of potentially toxic elements in high elevation Mediterranean ecosystems.	Uso de Líquenes nativos / Bioacumulación.	<i>Cetraria islándica</i> se utilizó para la evaluación de la contaminación a lo largo de una gradiente altitudinal en el Macizo de Majella, Italia. Muestras de este líquen se recogieron cada 200m de altura, y se analizaron para determinar el contenido de Elementos Potencialmente Tóxicos. El resultado de este estudio reveló los impactos potenciales de la contaminación del aire de largo alcance. Elementos como Al, Cr, Li, Mg mostraron concentraciones decrecientes con la elevación, estos elementos son materiales terrígenos, lo que demostraría una contaminación del talo por suelos contaminados. Elementos como el Pb, Hg mostraron una concentración creciente con la elevación y por factores meteorológicos como la precipitación, estos elementos están sujetos a transportarse a larga distancia. La composición elemental en líquenes de ecosistemas remotos de alta elevación son el resultado de emisiones naturales y antropogénicas, y dado que en área de estudio no hay fuentes de emisión antropogénicas, el transporte atmosférico de contaminantes a larga distancia puede estar involucrado en la contaminación de los talos analizados.

Autor	Nombre del Estudio	Técnica/Parámetro	Descripción
ROLA, Kaja; OSYCZKA, Piotr, 2019	Temporal changes in accumulation of trace metals in vegetative and generative parts of <i>Xanthoria parietina</i> lichen thalli and their implications for biomonitoring studies	Trasplante de líquenes / Bioacumulación	Estudio realizado en Cracovia, Polonia, en un área industrial con fuertes emisiones contaminantes por parte de una gran acería y una planta de calefacción que funciona con carbón. Se analizó los cambios temporales en la composición elemental en <i>Xanthoria parietina</i> , el análisis se realizó con referencia a las partes vegetativas y generativas del líquen, y se verificó si existe una diferencia entre estas, en la acumulación de contaminantes. El estudio resultó que las partes vegetativas y generativas difieren en la acumulación de elementos, los apotecios del líquen poseen menos cantidad de contaminantes que la parte vegetativa.
KŁOS, Andrzej, et al, 2018	Using moss and lichens in biomonitoring of heavy-metal contamination of forest areas in southern and north-eastern Poland	Uso de Líquenes nativos / Bioacumulación.	El Biomonitoreo se realizó en áreas boscosas en el sur y el noreste en Polonia para determinar contaminación por elementos metálicos. Se comparó la composición metálica entre los bosques mencionados. Los líquenes demostraron que el sur de Polonia se encuentra más contaminado con Pb, Hg, Ni y Zn.

Fuente: Elaboración Propia.

La relación física de los simbioses podría ser, sin contacto, donde las hifas del hongo pasan a lo largo de la cianobacteria y mediante la producción de un componente producido por el Fotobionte, las sustancias producidas por ambos organismos simbióticos se difunden, esta relación es típica de la especie *Collema sp.* Y cuando la relación simbiótica se da con contacto físico, la hifa del micobionte está estrechamente adherida, formando talos intramembranosos. En cuanto a la proporción de los simbioses en el talo, el Fotobionte por lo general se encuentra en un 7%, esta proporción determina la forma del talo. Existen cuatro biotipos de líquenes según la formación de su talo, estos son **Crustosos, Foliosos, Fructicoso, Dimorficos**. Los **crustosos** están completamente adheridas al sustrato, los **foliosos** poseen lóbulos que se igualan a las hojas de las plantas, estos pueden ser laciniados, cuando todo el liquen esta adherido al sustrato por estructuras llamadas rizinas, o umbilicados que están unidos desde su parte central. Los líquenes **fructicosos** poseen ramificaciones y se asemejan a pequeños arbustos. Los líquenes **Dimorficos** poseen un talo horizontal adherido al sustrato que puede ser crustoso o folioso (escumulas), este es el talo primario, y el talo secundario, que se desarrolla de forma vertical y posee los cuerpos fructíferos del liquen. Según **la anatomía de los talos** se pueden diferenciar en **Homómeros**, donde el talo es simple y poco diferenciado, y los **Heterómeros**, donde el talo esta estratificado, en esta tipo de liquen se diferencia el **Córtex superior**, constituido por una capa fúngica, donde se pueden encontrar sustancias como la atranorina, ácido úsnico, que cumplen la misión de proteger el aparato fotosintético del Fotobionte frente a condiciones de estrés, debajo del córtex se sitúa **un estrato conformado únicamente por el Fotobionte**, que mantiene contacto con las hifas, debajo de esta capa se encuentra **la medula**, que posee el mayor grosor por tener la mayor parte de sustancias liquénicas y está conformado por hifas flojamente combinadas, permitiendo la entrada de agua, para la fotosíntesis, aire y la circulación de gases, y por último se encuentra el **córtex inferior**, con la función de transportar agua y gases al interior del talo. En cuanto a **la reproducción**, el micobionte es el principal elemento, el Fotobionte está limitado a la reproducción asexual. En cuanto a **la reproducción sexual**, el liquen posee un reproductor llamado ascocarpo, que contiene ascos, y estos contienen las ascosporas, esporas que tiene a misión de hallar

al Fotobionte apropiado para desarrollarse. Los ascocarpos pueden ser Apotecios, Peritecios y Lirelas. Básicamente el apotecio tiene forma de copa, dentro de el se encuentran los ascos. El peritecio tiene forma de matraz, estructura cerrada que se abre por algún tipo de poro, y las Lirelas, de forma alargada o de aspecto ramificado. En la **Reproducción Asexual**, los líquenes se reproducen a partir de sus fragmentos y también puede desarrollar estructuras vegetativas llamadas Soredios e Isidios. (ARROYO SÁNCHEZ, José A ntonio, 2022.) (HAWKSWORTH, David L.; ITURRIAGA, Teresa; CRESPO, Ana)

Figura. 1. Talo heterómero, vista trasversal de *Sticta Aff. Weigeli*.

Las flechas de arriba hacia abajo señalan el córtex superior, la capa del Fotobionte, medula, córtex inferior respectivamente



Fuente: ARROYO SÁNCHEZ, José Antonio, 2022.

Referente a la **Fisiología de los líquenes**, tenemos que existen diferentes roles fisiológicos por los simbios. Aspectos metabólicos como la Fotosíntesis y la Respiración, gracias a la clorofila el Fotobionte las puede llevar a cabo, para que el liquen se desarrolle adecuadamente, el proceso de fotosíntesis debe tener una tasa mayor al de la respiración para cubrir su demanda energética, por esta razón el liquen se debe mantener hidratado para que la fotosíntesis se realice de forma eficiente. Otro

aspecto fisiológico de los líquenes para su adecuado desarrollo es la Nutrición mineral y la acumulación de nutrientes, donde el agua y los nutrientes pueden ser captados por toda la superficie del liquen, los nutrientes pueden ser captados en forma de partículas o iones presentes en vapor de agua, nieve derretida o lluvia. Un tema importante también son los mecanismos de acumulación de metales. (ARROYO SÁNCHEZ, José Antonio, 2022.)

Se puede definir un organismo bioindicador, en general, como al individuo cuya fisiología se relaciona con las condiciones ambientales que lo rodean, de esta forma, el individuo refleja normalidad, cambios o perturbaciones de estas condiciones. En términos de Biomonitorio, es necesario mencionar a los Organismo Epifitos, como los líquenes – organismos vegetales que crecen sobre un sustrato usándolo solamente como soporte y no como fuente de nutrición – estos organismos obtienen la mayor parte de sus nutrientes de la atmosfera, por ello son susceptibles a los cambios atmosféricos, convirtiéndolos en bioindicadores ideales. (HAWKSWORTH, David L.; ITURRIAGA, Teresa; CRESPO, Ana.).

Convencionalmente, el monitoreo de la calidad del aire se evalúa utilizando instrumentos que implican costos elevados, instalación, operación y mantenimiento, factores limitantes que se relacionan con condiciones presupuestarias elevadas, además, para tener evaluaciones confiables de la calidad ambiental del aire, se necesita abarcar un espectro de espacio y tiempo bastante amplio, por la complejidad de las concentraciones de los contaminantes en el aire. (BOONPENG, Chaiwat, et al, 2018).

Tabla 3. Definiciones de términos en el tema de bioindicadores.

Termino	Definición
Bioindicadores	Organismos que manifiestan síntomas particulares en respuesta a cambios medioambientales, generalmente de manera cuantitativa.

Termino	Definición
Biomonitores	Organismos, su distribución o poblaciones, estudiadas a lo largo del tiempo y comparadas con valores estándar o encuestas (base –line survey), tomando en cuenta las desviaciones del comportamiento esperado.
Bioacumuladores	Organismos que acumulan sustancias particulares dentro de sus tejidos, cuyas concentraciones se determinan mediante métodos químicos
Biomarcadores	Cambios fisiológicos o bioquímicos ocasionados por compuestos químicos en un organismo.
Biopruebas	Exámenes (tests) biológicos sintomatológicos que comprenden un organismo bioindicador introducido (cultivado) y una unidad de registro
Bioensayo	Organismos que responden de una forma cuantitativa a la aplicación de alguna sustancia particular, y cuyas respuestas se miden mediante comparación con los efectos causados por sustancias de concentraciones conocidas.

Fuente (HAWKSWORTH, David L.; ITURRIAGA, Teresa; CRESPO, Ana.)

Un concepto a abarcar cuando se trata de Biomonitorio con Líquenes es el de **La Deposición Atmosférica**, proceso de importancia ambiental, que consta de la transferencia de gases y partículas desde la atmosfera hacia la superficie, sea terrestre o acuática. El efecto primario de este proceso es la limpieza del aire. Cabe mencionar que, dependiendo de los componentes atmosféricos, la deposición puede ser beneficiosa o perjudicial. Por ejemplo, el Nitrógeno en condiciones elevadas en la deposición atmosférica puede ser perjudicial porque ocasiona eutrofización, pero en condiciones normales se considera un aporte nutritivo adicional para las plantas. También uno de los efectos nocivos de la deposición, es la denominada lluvia acida. (PACYNA, J. M. Atmospheric deposition. 2008.)

En este sentido, los líquenes son ampliamente aceptados como herramientas de Biomonitorio efectivas de la deposición atmosférica y bioindicadores de la impureza atmosférica. Los procesos fisiológicos dentro de los talos liquénicos son sensibles a las concentraciones de contaminantes y estos acumulan una amplia gama de ellos, estos procesos fisiológicos responden de manera diferente a los contaminantes. (BOONPENG, Chaiwat, et al, 2018). La capacidad de los líquenes para acumular diferentes elementos contaminantes los hace ser bioindicadores a largo plazo y su relación con estos va a depender de varios factores, la física y química elemental, la concentración del contaminante en el aire, su solubilidad en agua, las condiciones ambientales, la fuente de emisión, la especie de liquen. (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021). Una característica de los líquenes también para mencionar, según GEISER, Linda H, et al, 2021 en periodos secos estos contaminantes se concentran en el tejido del liquen, y durante eventos de humectación tienen a acumularse o filtrarse en él, logrando un equilibrio dinámico a muchos de los contaminantes que están expuestos.

Los contaminantes del aire son una mezcla compleja de compuestos inorgánicos y orgánicos, y muchos de ellos son de interés toxicológico. La diversidad de fuentes de estos contaminantes está ligadas a la forma de cómo se desarrolla la vida del ser humano, la urbanización, por ejemplo, proceso por el cual se extienden y desarrollan las ciudades, ha transformado características de áreas naturales; contaminación ambiental, pérdida de biodiversidad son generadas cuando las ciudades crecen y se desarrollan. Se estima que el 54% de la población mundial se desarrolla en las ciudades. (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021).

La contaminación del aire, es una de las amenazas que afectan a la biota y a los ecosistemas terrestres de todo el mundo, impulsando la pérdida de biodiversidad y la alteración de los servicios ecosistémicos. (VANNINI, Andrea, et al, 2021)

La emisión de contaminantes relacionados con el **tráfico vehicular**, proceden de la combustión de los combustibles (Pb y Ba), el deterioro de neumáticos, frenos, motores y vehículos (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Sb, V, Zn) e, indirectamente, por resuspensión de suelo (Al, Fe) y polvo de la calle. (HUANG, Ying-ping, et al, 2019)

En cuanto a la **gestión de residuos municipales**, los vertederos también son fuentes importantes de emisiones contaminantes, desechos de papel, plásticos, metales, llantas usadas, textiles, materiales de construcción, residuos orgánicos, cenizas de residuos incinerados y más son residuos que se depositan en vertederos (PAOLI, Luca, et al, 2018).

La exposición a contaminantes como es el **material particulado PM**, se asocia con problemas de salud y aumento de mortalidad, al poseer un tamaño diminuto como es con el PM2.5, puede en el ser humano alcanzar a los alveolos y luego distribuirse por todo el cuerpo, generando problemas respiratorios y cardiovasculares e incluso la muerte. (VARELA, Z., et al, 2018). La exposición crónica a Material Particulado puede producir varios tipos de patologías en lo seres humanos y la deposición de metales en tejidos blandos y duros del cuerpo. Estudios epidemiológicos han asociado la contaminación derivada de industrias de energía, química, minera con cáncer pediátrico y en adultos, un estudio de sobre los niveles de As. Cd, Cr, Cu y Ni en la orina de niños en Huelva, España, ciudad industrializada demostró que los niveles de Cd eran superiores a los niveles mostrados por otros sitios europeos. (PARVIAINEN, Annika, et al, 2019)

Un grupo de importancia en cuanto a los elementos contaminantes se refiere son los **Compuestos Orgánicos Persistentes (COP)**, elementos que tienen como fuente de emisión como son las emisiones vehiculares, industriales, de calefacción doméstica, dentro de estos compuestos se encuentran las dibenzodioxinas policloradas (PCDD), los dibenzofuranos policlorados (PCDF) y los bifenilos policlorados (PCB). Estos compuestos son relevantes por su toxicidad y su persistencia en el ambiente, además de biomagnificarse en la cadena alimentaria. (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021)

Otro tema a tratar también, relacionado con el impacto de las acciones antropogénicas es el **deterioro de áreas forestales**, su transformación en tierras de cultivo, vegetación secundaria o pastizales se han realizado debido a las crecientes necesidades humanas ligadas a la alimentación, fibra, madera y otros bienes, esto ha hecho que la biodiversidad del bosque se vea afectada, uno de estos organismos son los líquenes. (BENÍTEZ, Angel, et al, 2018)

Ahora, la importancia de monitorear la calidad del aire radica en la repercusión de la contaminación en la salud de los ecosistemas, y por lo tanto en la salud humana, en la actualidad, el biomonitoreo es una buena y eficaz herramienta para monitorear la calidad ambiental, en comparación del monitoreo clásico, la ventaja del uso de organismos para el análisis de la contaminación atmosférica es que es un método económico que permite la libre planificación del número de sitios de medición, pudiendo tejer extensas y densas redes de monitoreo. (KŁOS, Andrzej, et al, 2018)

Para el uso de Líquenes como Bioindicadores, dependiendo de la disponibilidad del organismo en el área de interés se ha desarrollado dos tipos de técnicas. El uso de ***Liquen nativo y el uso de Liquen Trasplantado.***

Cuando la zona de estudio posee líquenes nativos, generalmente, el enfoque para evaluar la calidad ambiental se centra en la Diversidad total de líquenes, enfocada en la Diversidad Taxonómica o la Diversidad Funcional – enfoque también utilizado cuando se aplica la técnica de trasplante - las características funcionales, denominadas rasgos funcionales, incluyen aspectos morfológicos, fisiológicos, fenológicos, estructurales o conductuales de cada organismo y se consideran relevantes para comprender su respuesta a las propiedades ambientales y del ecosistema, un estudio de LUCHETA, Fabiane, et al, 2018, evalúa estos 2 enfoques con líquenes nativos en el sur de Brasil.

El ***trasplante del liquen*** se realiza por la insuficiencia o ausencia de líquenes en la zona de estudio, esta técnica proporciona también homogeneidad para el proceso de evaluación de la calidad ambiental. (BOONPENG, Chaiwat, et al, 2018). En esta técnica se toman líquenes de una zona relativamente sin contaminación y se instalan en la zona de estudio. Existen ventajas con respecto a la técnica de uso de líquenes nativos, los trasplantes pueden proveer información de zonas que están desprovistas de líquenes nativos por el exceso de contaminación y asegura la uniformidad de líquenes como acumuladores de contaminantes, ya que por lo general esta acumulación varía entre especies de líquenes. (ZHAO, Lili, et al, 2019)

El Biomonitorio con líquenes se puede llevar a cabo de las siguientes formas: **(1)Determinando métricas de diversidad total, (2)Determinando métricas de diversidad funcional, (3)Midiendo parámetros fisiológicos de los líquenes, (4) Bioacumulación de contaminantes en líquenes.** VARELA, Z., et al, 2018 cita a Branquinho et al. (en prensa) que realiza las siguientes afirmaciones: Para la elección de la mejor forma de evaluar al contaminación, con el enfoque basado en la biodiversidad, se tiene que analizar y comprender al factor impactante, una intensidad baja de este factor afectaría de forma individual al desempeño del liquen, aquí el mejor parámetro medible sería relacionado a la ecofisiología del liquen, y si el factor impactante es de intensidad media podría afectar a la capacidad ecológica del liquen, produciendo cambios en la abundancia de la especie, así como en su funcionalidad como comunidad, esto en las especies sensibles, antes que las tolerantes, el parámetro medible sería relacionado con los rasgos funcionales y si el factor impactante es de intensidad elevada, podría afectar en la pérdida de especies, pudiendo reflejar una medición basada en diversidad taxonómica. (VARELA, Z., et al, 2018)

Los estudios basados en ***diversidad de especies de líquenes como bioindicación***, como primer paso para el desarrollo de la evaluación, se identifican las especies del área de estudio consultando literatura taxonómica disponible para cada continente. (VARELA, Z., et al, 2018) (BENÍTEZ, Angel, et al, 2018), algunos estudios, además de tener una guía de determinación de las especies de líquenes, hacen uso de sustancias químicas que reaccionan con el tejido del liquen, o hacen uso de estereoscopio y microscopio para el reconocimiento de especies. (AGNAN, Yannick; PROBST, Anne; SÉJALON-DELMAS, Nathalie, 2017).

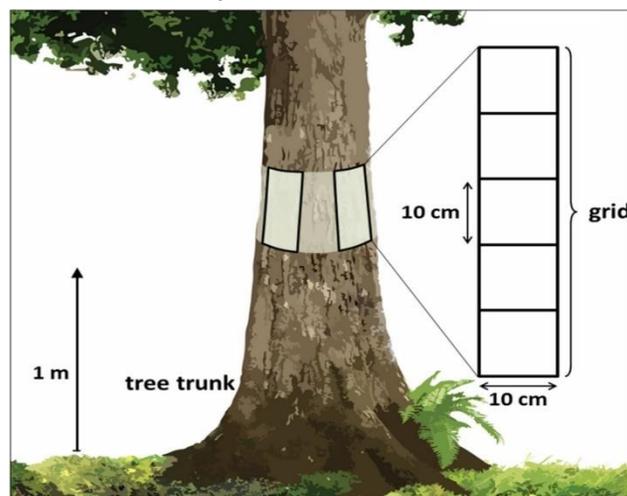
El desarrollo de comunidades de líquenes epifitos en troncos de árboles depende de varios factores ambientales y del propio sustrato, el grado de iluminación y humedad del ambiente, la edad, pH de la corteza y con ello la contaminación ambiental. Los líquenes epifitos poiquilohidricos – que carecen de un mecanismo para regular el contenido hídrico – dependen únicamente de la atmosfera, la lluvia como fuentes de nutrición. Por ende, el contenido elemental de la atmosfera influirá a los líquenes como

individuos y como comunidad. La disminución de líquenes epifitos en áreas contaminadas por emisiones antropogénicas se la ha atribuido específicamente a la absorción de ácido sulfúrico (H_2SO_4), derivados del dióxido de azufre (SO_2) en condiciones de humedad, esto conlleva a cambios morfológicos y fisiológicos en el talo liquénico, específicamente en las capas del Fotobionte. (MANNINEN, Sirkku, 2018)

Para asociar los valores de diversidad de especies de líquenes con los niveles de contaminación, donde las comunidades de líquenes se ven inducidas a cambios motivados por la contaminación LEBLANC, SC Fabius; SLOOVER, Jacques De, 1970, propuso el **Índice de Pureza Atmosférica (IPA)**, que se calcula a partir del número de especies presentes y la frecuencia de cada una de ellas en los diferentes sitios del estudio, entre las unidades de forófitos por sitio. El IPA se sugiere como buena herramienta para clasificar zonas según la intensidad de contaminación, la condición limitante para esta herramienta es el uso de especies de forófitos con las mismas condiciones, físicas y químicas. Para algunos escenarios como por ejemplo las ciudades, donde el crecimiento de estas implica la tala y la plantación de árboles, induce a que las especies de árboles sean diferentes, por lo tanto, sean áreas de difícil aplicación del IPA. (CORREA-OCHOA, Mauricio Andres, et al, 2020)

Figura. 2. Procedimiento de muestreo.

Utilizando una cuadrícula de 10 cm x 50 cm en el tronco del árbol en los cuatro puntos cardinales.



AGNAN, Yannick; PROBST, Anne; SÉJALON-DELMAS, Nathalie, 2017

En VALDIVIA, Diego; RAMÍREZ, Ángel, 2018 para conocer los niveles de contaminación atmosférica mediante líquenes se realizó un estudio con enfoque en la riqueza de especies, el uso de IPA y la concentración de metales en el pasivo ambiental minero de Santo Toribio, Ancash. Para evaluar la contaminación mediante el IPA se aplicó la siguiente ecuación:

$$IPA = \sum_n^1 \frac{(Qxf)}{10}$$

Q= Cortejo medio específico, se calcula determinando la media del número de especies que acompañan a la que estamos calculando en todas las estaciones.

f= Frecuencia de cada especie, se calcula:

$$f = \frac{P + RM}{2}$$

P = Presencia media de una especie en una estación, equivale al número de forófitos donde fue encontrada la especie, dividido entre el número de forófitos estudiados en cada estación.

RM = Recubrimiento medio, es el cociente entre el recubrimiento total (área o cobertura que ocupa el líquen) en la estación y el número de sustratos muestreados en la estación.

$$Rm = \frac{Rt}{n}$$

Rt = Recubrimiento total de una especie en una estación determinada, es la suma del recubrimiento de la especie en cada una de los sustratos muestreados. Este valor es subjetivo, por lo que se detalla los niveles de recubrimiento total:

- Cuando la especie recubre de 0 a 10% de la superficie, el valor es 1.
- Cuando la especie recubre de 10 a 20% de la superficie, el valor es 2.
- Cuando la especie recubre de 20 a 35% de la superficie, el valor es 3.
- Cuando la especie recubre de 35 a 50% de la superficie, el valor es 4.
- Cuando la especie recubre de 50 a 100% de la superficie, el valor es 5.

VALDIVIA, Diego; RAMÍREZ, Ángel, 2018 adapta la clasificación de Leblanc & De Sloover, 1970 en la siguiente tabla:

Tabla 4. Clasificación de Índice IPA

Zonas	IPA	Descripción
I	1 al 5.5	Ausencia de líquenes – Zonas de mayor contaminación
II	>5.5 al 15.5	Pobre presencia de líquenes – todavía hay presencia de áreas contaminadas
III	>15.5 al 35.5	Llamada zona de transición – líquenes no son excesivos, pero están bien representados
IV	>35.5 al 75.5	Zona donde la calidad del aire es buena y favorable para el crecimiento de líquenes.
V	>75.5	Zona exuberante donde las condiciones son muy favorables para el crecimiento de líquenes.

Fuente VALDIVIA, Diego; RAMIREZ, Ángel, 2018

Se sabe que los factores como el microclima y la corteza de los forófitos influyen en la diversidad de líquenes, por esa razón, cada sitio de estudio tendría que abarcar una

área representativa del total del área del estudio, la selección de las especies de árboles hospedantes se basa en escoger árboles que tengan >10° de inclinación en relación a la vertical y tenga el diámetro del tronco sea mayor que 40cm, las muestras de líquen se toman en cuenta cuando están entre 1 o 2 metros sobre el suelo, para evitar la influencia del suelo, para la recolección de muestras se utiliza una rejilla, cuadrícula de 50 x 10 cm, con cuadrados de 10 x 10, y se coloca en los 4 puntos cardinales del árbol (figura 2). (AGNAN, Yannick; PROBST, Anne; SÉJALON-DELMAS, Nathalie, 2017)

Asimismo, para hacer una evaluación basada en **rasgos funcionales**, a cada líquen encontrado se le clasifica según sus rasgos, que de forma amplia detalla BENÍTEZ, Angel, et al, 2018:

Tabla 5. Rasgos y categorías funcionales de líquenes.

Rasgo Funcional	Categoría
Tipo de Fotobionte	*Clorococoides *Cianobacteria *Trentepolia
Forma de crecimiento	*Incrustante *Crustoso con prótalo *Folioso con lóbulos anchos *Folioso con lóbulos angostos *Folioso placodioido *Filamentoso *Fruticoso *Gelatinoso *Escamuloso
Tamaño	*Macrolíquenes *Microlíquenes
Tipo de reproducción	*Asexual *Sexual *Asexual y sexual
Estructura reproductiva	*Apotecios *Isidios *Lirellae *Peritecios *Soredia
Tabicación de ascosporas	*Simple *Septado *Muriforme
Tamaño de ascosporas	*Pequeño <100um ² *Medio >100um ² *Grande >500um ²
Color de talo	*Oscuro *Luz

Fuente: BENITEZ, Angel, et al, 2018.

Con esta clasificación, se puede calcular una de métrica basada en rasgos. La abundancia de cada grupo funcional (**Índice de Diversidad de Líquenes - IDL, medida recomendada por la Unión Europea**) en cada sitio del área de estudio, se calculó como la suma de la frecuencia de todas las especies pertenecientes a ese grupo funcional. Esto se calcula como la suma de la frecuencia de líquenes epífitos en una cuadrícula de muestreo de 10 × 50 cm dividida en cinco cuadrados de 10 × 10 cm² colocados en árboles seleccionados y también se calculó el número de especies pertenecientes a cada grupo funcional. Para calcular el IDL de cada árbol, corresponde a la suma de frecuencias de los líquenes epífitos en la cuadrícula y para IDL promedio de cada sitio de un estudio es la aritmética media de los árboles muestreados dentro de cada sitio. El valor de IDL más bajos, corresponden a los sitios con mayor contaminación. (VARELA, Z., et al, 2018) (PAOLI, Luca, et al. 2018)

En cuanto a **los Parámetros Fisiológicos** y su relación con la perturbación ambiental, se consideran para la recolección y muestra, una o pocas especies de líquenes, para este tipo de métrica. Para esta métrica se puede aplicar las dos técnicas de bioindicación, el uso de líquenes nativos y el de trasplante de líquenes, a diferencia de los enfoques basados en diversidad de especies o de rasgos funcionales, que utilizan a los líquenes nativos de la zona. Muchas de las respuestas fisiológicas de los líquenes están relacionados con el tipo de contaminante, sean metales pesados, compuestos orgánicos volátiles, o más, lo que permite rastrear el origen y la fuente del contaminante, como ya sabemos, la fisiología de los líquenes no los hace diferenciar entre un elemento u otro para su absorción. (HUANG, Ying-ping, et al, 2019) (PINHO, P., et al, 2017) (DRESLER, Sławomir, et al, 2021) (MARIÉ, Débora C., et al, 2018)

Se tiene registrado que los metales pesados interfieren en **parámetros fotosintéticos** del líquen, el contenido de clorofila, la tasa de degradación de clorofila, el índice de estabilidad de la clorofila y su fluorescencia son afectados significativamente. Por ejemplo, las consecuencias del Pb sobre las especies **Lobaria pulmonaria y Parmelia caperata** hacen que Fv/Fm (relación entre la fluorescencia variable y la fluorescencia máxima de la clorofila) se reduzca significativamente, lo que

demuestra la sensibilidad de la clorofila por la contaminación por Pb. (HUANG, Ying-ping, et al, 2019)

En cuanto a los parámetros fisiológicos relacionado con el Fotobionte está la evaluación de la eficiencia fotosintética, una de las evaluaciones más utilizadas. La primera etapa de la fotosíntesis la lleva a cabo el aparato fotosintético II (PSII), el análisis de la **fluorescencia de la clorofila a (Chl a)** puede ofrecer información de la efectividad del PSII. La exposición a diferentes tipos de contaminantes (como SOX, NOX, Metales) provoca un deterioro del proceso fotosintético, usualmente medido con fluorímetros portátiles con relación Fv/Fm. (MALASPINA, P.; MODENESI, P.; GIORDANI, P, 2018)

La Emisión de la Fluorescencia de la Clorofila, indicador de la eficiencia fotosintética, Fv/Fm, donde Fv es igual a la $F_0 - F_m$, estos valores son la fluorescencia mínima y la fluorescencia máxima. Para la medición de este factor se identifican las muestras del líquen a estudiar pudiéndose realizar la medición *in situ*, o en laboratorio, para realizar el análisis, las muestras se limpian de polvo, hojas, material extraño de la superficie, luego, las muestras se rehidratan y se adaptan a la oscuridad por entre 10 y 30 minutos, esto se realiza para que se normalicen los valores de Fv/Fm, ya que, de forma natural, la pérdida de agua es un factor sensible que altera la fotosíntesis. Para medir los parámetros de fluorescencia se utilizó un Sistema Abierto de Cámara de Gases LI-6400, LI-COR con una cámara de Fluorescencia Integrada LI-Fluorómetro de cámara foliar 6400-40. (HUANG, Ying-ping, et al, 2019).

En los estudios analizados PIOVÁR, J., et al, 2017 utiliza un fluorómetro portátil AquaPen-P AP-P 100, y utiliza un fluorómetro Open FluorCam FC 800-O/1010 equipado con una cámara CCD y un sistema de análisis de imágenes. Estos procesos se llevaron a cabo in situ y en laboratorio, dependiendo del artefacto de medición, estas mediciones se pudieron repetir ya que este método no es destructivo. Estas mediciones se compararon con mediciones en el sitio de control. La Fluorescencia de la Clorofila está estrechamente ligado a la absorción de metales, por eso se acompaña del análisis de concentración de metales (bioacumulación). (PIOVÁR, J., et al, 2017)

Un estudio realizado por MALASPINA, P.; MODENESI, P.; GIORDANI, P, 2018, consideró utilizar al SO₂ como indicador de contaminación del tráfico industrial y marítimo y al NO₂ para el tráfico urbano, en varias zonas con intensidades de contaminación diferentes, relacionando el impacto de estos compuestos en la fluorescencia de la clorofila, observando disminuciones de Fv/Fm en relación al gradiente de contaminación.

Para conocer la **Degradación de la Clorofila** se utiliza el coeficiente de feofitinización OD₄₃₅/OD₄₁₅, que son valores de densidad óptica OD (o Absorbancia, métrica para calcular cuanta luz absorbe un objeto y cuanta luz pasa a través de un objeto) en longitudes de onda de 435nm entre 415nm. La feofitina, es un pigmento fotosintético derivado de la clorofila en el que se ha eliminado un metal, este demuestra el grado de degradación de la clorofila. Los valores de esta métrica oscilan entre 1.2 y 1.4 son para líquenes sanos donde la clorofila no está degradada, los valores cercanos a 1 o inferiores indican un deterioro de la clorofila provocado por factores ambientales, por ejemplo, el efecto negativo de los metales pesados. Para este análisis se prepara el material de muestra líquénica para cada muestra: se realizan dos ciclos de extracción (45 min cada uno) en un baño tibio (65 °C) usando 5 mL de Dimetilsulfóxido (DMSO). La absorbancia de los extractos se midió utilizando un espectrofotómetro UV-visible a 435 y 415 nm. (PAOLI, Luca, et al, 2018) (PIOVÁR, J., et al, 2017)

Un estudio realizado por DRESLER, Sławomir, et al, 2021, utilizó 21 especies de líquenes para analizar la concentración de Alantoína, evaluando el nivel de antropopresión en relación al contenido de metales y el compuesto mencionado en áreas urbanas y naturales. La Alantoína es compuesto importante en la nutrición de las plantas, que contribuye a la adaptación y protección contra el estrés, pudiendo reducir el daño oxidativo que tiene la sequía o la salinidad en la planta, se ha demostrado que también el alto contenido de Alantoína es producto del nivel elevado de metales. Para el análisis de Alantoína se realizó utilizando un sistema de Electroforesis Capilar, equipado con un detector de matriz de diodos, este método permite la separación de moléculas biológicas. (DRESLER, Sławomir, et al, 2021)

Dentro de los parámetros fisiológicos ligados al Micobionte se pueden diferenciar el **Contenido de Ergosterol y la peroxidación lipídica de la membrana**, en la peroxidación lipídica de la membrana se analizó usando el ensayo de sustancias reactivas al ácido tiobarbiturico TBARS, este compuesto es producto de la descomposición de ácidos grasos poliinsaturados producidos durante la peroxidación de los lípidos de la membrana. Y el contenido de ergosterol, es un compuesto de la membrana celular de los hongos, permitiéndole un apropiado funcionamiento de este, una disminución del ergosterol significaría la pérdida de viabilidad del hongo. La medición de ergosterol se realiza casi en la oscuridad, ya que es sensible a la luz. La extracción se realiza en etanol al 99% y luego se centrifuga a 10.000 rcf durante 5 min. El sobrenadante se filtra y se almacena a bajas temperaturas (4°C) hasta el inicio del análisis. El ergosterol se midió por Cromatografía Líquida (HPLC), proceso por el cual se separan dos componentes de una mezcla. (ROLA, Kaja, et al, 2019) (PAOLI, Luca, et al, 2018)

El uso de **líquenes como acumuladores de elementos atmosféricos**, es una forma de bioindicación usada ampliamente, donde se aprovecha la sensibilidad que tienen los líquenes con diversos contaminantes, el uso de trasplantes de líquenes en zonas urbanas con elevado tráfico, con fuentes industriales de contaminación, ha permitido elaborar redes de monitoreo de elementos contaminantes, como son el Material Particulado. (SUJETOVIENĚ, Gintarė, et al, 2019)

Cambios anatómicos se propician en los líquenes cuando se trata de absorción de contaminantes, cuando se trata de metales existen tres (3) formas de acumulación en los líquenes: (1) atrapamiento de partículas sólidas; (2) unión extracelular con sitios de intercambio en las paredes celulares de los simbioses y (3) absorción intracelular, además esta acumulación va a depender también de la morfología del talo y sus propiedades. ROLA, Kaja; OSYCZKA, Piotr, 2019 realiza un estudio vinculando los cambios anatómicos de líquenes y sus cambios temporales de concentración de metales. Un individuo maduro de **Xanthoria parietina**, líquen foliáceo (figura 3), se compone de 2 partes, la parte vegetativa, que se compone del talo folioso, desprovisto

de estructuras reproductivas, y la parte generativa, donde se sitúan los apotecios, estructuras reproductivas. (ROLA, Kaja; OSYCZKA, Piotr, 2019)



Figura. 3. *Xanthoria parietina*

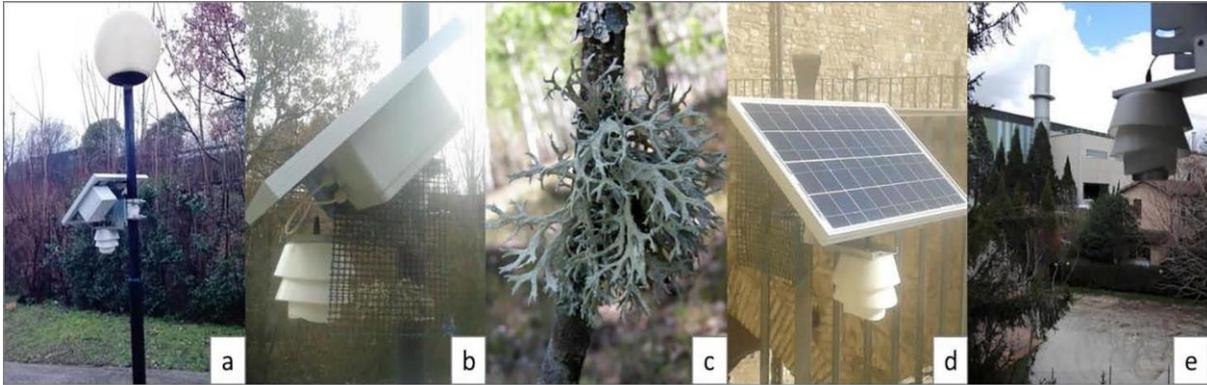
Para determinar la relación de las partes anatómicas del liquen y el contenido de metales se determinó un diseño de muestreo que abarcaba la recolección de especímenes maduros de una zona determinada en Cracovia, donde se habían trasplantado arboles hospedantes junto con *Xanthoria parietina*, para comparar la variabilidad anatómica y la acumulación elemental, las áreas de donde se tomaron las muestras diferían en los años en los que habían sido trasplantados los árboles, ya que en un área el trasplante de los árboles había sido hace 14 años, y la otra área las muestras se tomaron apenas los árboles fueron trasplantados, entre área y área había una distancia de 2km. Las concentraciones se determinaron mediante **espectrometría de absorción atómica de llama** utilizando un espectrómetro de absorción atómica para Cu, Zinc, Pb, Cd, Ni y Cr. Estos metales son elementos perceptibles del material particulado. Para la observación de las partes anatómicas, se seleccionaron los apotecios de tamaño uniforme y los lóbulos también, las muestras fueron teñidas con una solución azul, para su observación a través de un microscopio óptico, cada

muestra estuvo representada por 3 portaobjetos que contenían 120 secciones transversales. Se eligieron las secciones transversales más claras; Se tomaron 10 fotografías representativas de cada muestra utilizando un aumento de 40x. La mayoría de elementos metálicos fueron influenciados por el tiempo de trasplante de los árboles, y todos los contaminantes se observaron en condiciones más altas en las partes vegetativas de los líquenes. Esto indica que la exposición a largo plazo a la contaminación del aire se refleja en una mayor cantidad de elementos contaminantes en el líquen talo y sugiere una mayor absorción pasiva de estos elementos con el tiempo. (ROLA, Kaja, et al, 2019)

En MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019, se usó trasplantes de líquenes para medir la contaminación en una área urbana – industrial en el centro de Italia, área con fuentes importante de contaminantes, tráfico vehicular, red ferroviaria, calefacción doméstica, central de tratamiento de residuos y siderúrgica, hacen que esta sea una zona con baja calidad del aire. El uso de La elección de los lugares del área a monitorear se hizo de forma representativa considerando las fuentes de contaminación. En el estudio se comprobó la eficiencia de los Líquenes como bioacumuladores colocándolos junto a muestreadores de PM10 de alta resolución espacial llamados HSRS en cada sitio de muestreo (figura 4). La recolección de los trasplantes de líquenes se hizo de un área no contaminada (control) al área de estudio. Los trasplantes de líquenes se fijaron junto a los HRSS, ambos con las mismas condiciones, a 1 o 2 metros sobre el suelo y con exposición sur, para garantizar el muestreo homogéneo. Los análisis de los trasplantes constaron de mineralizar la muestra en un horno de microondas, con Acido Nitríco, Peroxido de Hidrogeno y se filtraron. Una vez preparada la muestra se analizaron La concentración de 21 elementos (As, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Mg, Mn, Mo, Nb, Ni, Pb, Rb, Sb, Sn, Ti, Tl, W) en el Los líquenes mineralizados en T0, T1 y T2 se determinaron mediante espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente. En la extensa área de estudio pudo ser abarcada por la red de monitoreo que se implementó.

Figura. 4. Muestreadores HSRS junto a Liquen *Evarnia prunastri*.

a, b, d, e) Muestreadores HSRS alimentados por panel solar y Trasplante de líquenes fijados en redes plásticas. c) liquen *Evarnia prunastri*.



FUENTE: MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019

El enfoque que se da para usar a los **líquenes como bioacumuladores** se centra también en la importancia de los monitorear elementos contaminantes del aire, como los Metales o Compuestos orgánicos volátiles COP, estos dos compuestos son de interés toxicológico por el gran perjuicio a la salud pública, entre los COPs se encuentran las dibenzodioxinas policloradas (PCDD), los dibenzofuranos policlorados (PCDF) y los bifenilos policlorados (PCB), cuyas fuentes de emisión son procesos ligados a la transformación de residuos en energía, y también a procesos de conformado y mecanizado de metales, que involucran Cloro elemental. La importancia de monitorear estos compuestos es persisten en el ambiente durante mucho tiempo y se biomagnifican en la cadena trófica. En el estudio realizado por MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021 se hizo la comparación de la acumulación de COPs en Líquenes trasplantados y la deposición de COPs medidas por muestreadores en sitios afectos por fuentes de emisión. Los trasplantes de líquenes se colocaron cercanas a los muestreadores, con las mismas condiciones para que proporcionen datos homegeneos. Para la determinación de los compuestos objetivo se utilizó un cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas de sector magnético de alta resolución, al igual que el estudio anterior, se permitió tejer una amplia red de monitoreo. (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021)

La acumulación de elementos contaminantes en los tejidos liquénicos permite revelar el contenido de estos elementos en el ambiente, y a la vez permite tejer amplias redes de monitoreo haciendo uso del trasplante de líquenes, obteniendo un panorama más abierto en cuanto a la distribución espacial del o de los elementos contaminantes, muchos de estos elementos, potencialmente tóxicos, tienen durabilidad y persistencia en el ambiente, esta característica hace que, dependiendo de factores meteorológicos se distribuyan de forma dispersa por el ambiente, en ese sentido, los **muestreadores pasivos** permiten que se identifiquen fuentes no puntuales de elementos contaminantes y su resolución espacial, a diferencia de los muestreadores activos que son útiles para monitorear fuentes de emisión puntuales de elementos específicos. Los muestreadores pasivos, como lo son los **Líquenes epífitos**, nos proporcionan datos de concentración promediados en el tiempo, la gran ventaja de usar líquenes epífitos como muestreadores pasivos es que pueden abarcar gran área de superficie; tienen buena distribución con facilidad de recolección; y poseen una tasa de crecimiento lenta con larga vida útil (KLAPSTEIN, Sara J., et al, 2020)

Contaminantes como el NO_x y SO_x son formas reactivas que producen compuestos como el Nitrato NO₃⁻, Amonio NH₃⁺, Sulfato SO₄²⁻, actividades antropogénicas como los procesos de combustión, y la agricultura son fuentes importantes de estos elementos que contribuyen al efecto invernadero, la acidificación del suelo, la eutrofización del agua, impactos con resultados negativos en el ecosistema. Los bioindicadores al ser parte del ecosistema, proveen de información cualitativa y cuantitativa de la alteración ambiental, como por ejemplo la Deposición atmosférica, mediante la observación de la biodiversidad y la acumulación de contaminantes dentro de sus organismos. En el estudio de SERRANO, Helena Cristina, et al, 2019, se utilizó **Parmotrema hypoleucinum** (del tipo Folioso), especie abundante de la región de estudio, el uso de líquenes nativos asegura que estos hayan estado expuestos por largos periodos a la deposición de contaminantes, esto representa una integración temporal de la deposición. (SERRANO, Helena Cristina, et al, 2019)

Existen zonas, como Nueva Escocia, Canadá, que poseen cualidades naturales y antropogénicas, que la hacen ser un punto crítico para la acumulación de Mercurio y

otros metales traza en los ecosistemas, en parte asignado al transporte de largo alcance de la contaminación del aire. En esta zona se realizó un estudio evaluó el potencial de los líquenes epífitos (*Usnea spp.* del tipo Fructicoso) como muestreadores pasivos para la contaminación del aire por elementos potencialmente tóxicos en Nueva Escocia. Las áreas objetivo procedían de una región histórica de extracción de oro y una región conocida por ser un punto crítico biológico para el Hg en los organismos. Los lugares de donde se tomó las muestras de líquen, se registraron las coordenadas con un GPS, para luego ser trasladadas al laboratorio. Estas muestras se limpiaron, se secaron y se criomolieron usando nitrógeno líquido y se almacenaron en tubos de polipropileno de 50m hasta su análisis. Para determinar las concentraciones de Hg, se utilizó el método de pirólisis térmica con absorción atómica de amalgamación de oro, Otras concentraciones de elementos, incluidos hierro (Fe), aluminio (Al), zinc (Zn), selenio (Se), cromo (Cr), plomo (Pb), arsénico (As), níquel (Ni), cobre (Cu), cobalto (Co), cadmio (Cd) y estaño (Sn), se determinaron utilizando un espectrómetro de masas de acoplamiento inductivo. (KLAPSTEIN, Sara J., et al, 2020)

Para el **análisis de concentración de metales**, habitualmente, las muestras se llevan al laboratorio para su estudio. En este análisis, las muestras de talo de líquen pasan por el proceso de secado a peso constante, para luego ser pulverizadas. El polvo resultante se digiere con soluciones de Ácido Nítrico HNO₃, Ácido Perclórico HClO₄, Peróxido de hidrogeno H₂O₂, Ácido Fluorhídrico HF, la mezcla resultante se filtra y se diluye con agua bidestilada. Los metales a analizar se analizan mediante Espectrometría de Absorción Atómica, Espectrometría de masas de acoplamiento inductivo, estos análisis se repiten al menos 3 veces. (PIOVÁR, J., et al, 2017) (HUANG, Ying-ping, et al, 2019) (PAOLI, Luca, et al, 2018)

Un tema a discutir y analizar, es el tiempo en el que tarda un líquen en responder a las condiciones atmosféricas, el empeoramiento o mejora de las condiciones del líquen en responder a los cambios de su entorno, va a depender de su especie, edad, morfología del talo, estado fisiológico, duración de la exposición, condiciones microclimaticas y con respecto al contaminante, su presencia, concentración y el tipo de contaminante. (PAOLI, Luca, et al, 2018). El **tiempo de integración** es la expresión de tiempo en el

cual las concentraciones del contaminante del líquen reflejan la concentración del contaminante en el ambiente, este tiempo depende del elemento, la especie del líquen y las condiciones ambientales. El tiempo de integración es un dato importante para que el Biomonitorio sea confiable. (ZHAO, Lili, et al, 2019)

En el estudio de PAOLI, Luca, et al, 2018 para estimar el tiempo en el que el líquen responde a los cambios de su entorno, recolectó *Flavoparmelia caperata* (del tipo folioso) de una zona cercana a un vertedero y se expuso a una zona remota no contaminada, por el contrario, se trasladó muestras de líquen de la zona remota a la zona del vertedero. Para evaluar el tiempo de respuesta se analizaron parámetros ecofisiológicos y la variación del contenido químico, antes y después del traslado, Fluorescencia de clorofila, degradación de clorofila y pruebas relacionadas al micobionte fueron los análisis evaluados.

El estudio realizado por ZHAO, Lili, et al, 2019, donde uno de sus objetivos fue evaluar el tiempo de integración de los contaminantes a los líquenes *Flavopunctelia soledica* y *Rhizoplaca chrysoleuca* (dos especies del tipo Folioso) esto a lo largo de dos carreteras, en un área altamente contaminada en China, llama Hebei. Se analizó las concentraciones de 25 elementos Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cs, Cu, Fe, K, La, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, S, Sb, Sm, Sr, Tb, Th, Ti, V y Zn) se determinaron utilizando un espectrómetro de masas de plasma acoplado inductivamente. Las condiciones meteorológicas en la exposición del trasplante fueron de una contaminación alta, característico de los inviernos en la zona, donde se presenta Smog en forma de aerosol, con alto contenido de SO₂, PM 2.5 y PM10, esto debido a las emisiones antropogénicas como el tráfico, prácticas agrícolas, la calefacción con combustión de carbón. La exposición de la muestra duro 12 meses

III. METODOLOGIA

3.1. Tipo y diseño de investigación

El diseño de la investigación realizada es no experimental, basada en fenómenos, sucesos, estudios de una realidad y tiene como característica ser reflexivo, interactivo. Explicando el fenómeno de una manera sistematizada. El tipo de investigación es del tipo Básico, realizando un proceso de búsqueda especializado sobre el tema de estudio. (TINOCO CUENCA, N., CAJAS PALACIOS, M. y SANTOS JIMÉNEZ, O., 2018)

3.2. Escenario de estudio

Al ser una revisión sistematiza de un tema específico, y recopilando información enfocada en los objetivos del estudio, el escenario de estudio sería todos los entornos donde se desarrollaron cada artículo de investigación, teniendo artículos nacionales e internacionales, áreas de interés científico por sus condiciones climáticas.

3.3. Participantes

La base de datos ScienceDirect es el participante de la investigación, al ser la fuente principal de la información revisada. La información de estas bases de datos es calificada y de calidad.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

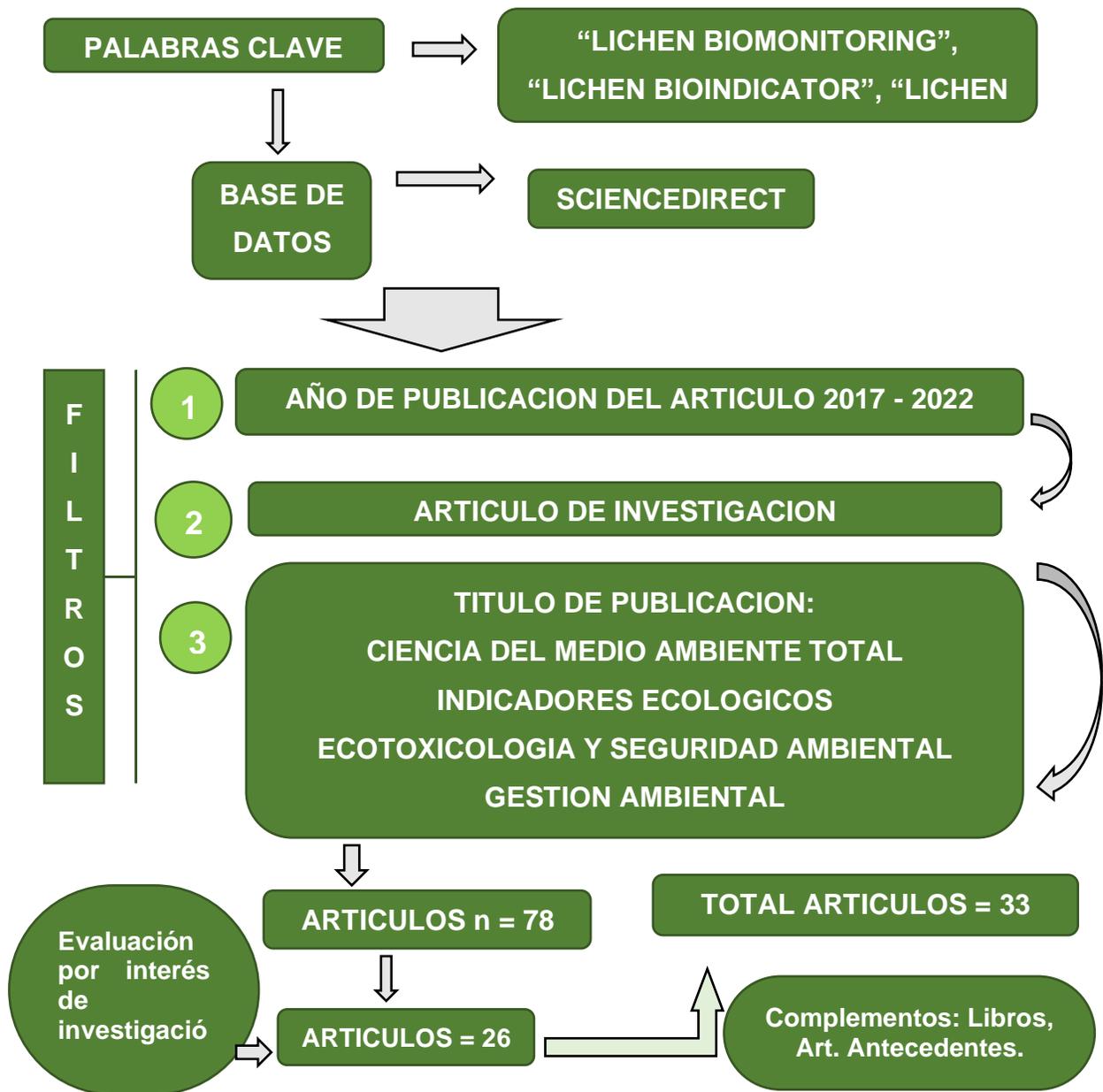
Se desarrollo una revisión sistemática en la base de datos Sciencedirect acerca de líquenes como bioindicadores, detallando la información acerca de los autores de los artículos, año, lugar de la investigación, y acerca del enfoque de la investigación realizada se evaluó la técnica de monitoreo, los parámetros de medición, los contaminantes y los entornos donde se aplica el Biomonitoreo.

3.5. Procedimiento

Se realizo la búsqueda de los artículos científicos colocando en el motor de búsqueda las palabras: "lichen bioindicator", "Lichen biomonitoring" "Lichen pollution" en la base de datos ScienceDirect, de ella se produce una búsqueda general del tema dando como resultado 1,139 resultados. Posteriormente se hace uso de los filtros los cuales nos hace ser más específicos en la búsqueda de información, haciendo la elección de

estudios publicados entre el 2017 y 2022, además se seleccionan otros filtros necesarios, que sea un artículo científico y que el título de la publicación sea relacionado con Indicadores ecológicos, contaminación ambiental, ecotoxicología, gestión ambiental, lo cual nos da como resultado 78 artículos para revisar, teniendo en cuenta el interés de investigación se hizo la elección de 26 artículos científicos, y se sumaron libros y artículos de investigación nacional, teniendo en total 33 artículos.

Figura. 5. Procedimiento de recolección de datos



3.6. Categorías, subcategorías y matriz de categorización.

Se hizo esta categorización acorde a los objetivos específicos y los problemas específicos, la cual se manifiesta en la Matriz de categorización anexada.

3.7. Aspectos éticos

La presente investigación tiene como título Revisión Sistemática. Líquenes como Bioindicadores eficientes y adaptables de la calidad ambiental, con la finalidad de avalar la presente, se ha tenido presente los siguientes aspectos éticos:

- a. Teniendo de referencia la norma ISO, se citó debidamente al autor de cada artículo científico, respetando la autoría de cada artículo
- b. Se cumplió con las normas vigentes de la Universidad Cesar Vallejo.
- c. La finalidad de la investigación es dar mayor alcance del tema de Líquenes como bioindicadores.
- d. Se brinda el consentimiento de esta investigación para el aprovechamiento de futuras investigaciones

3.8. Rigor científico

Se garantiza que la presente investigación es válida por el uso de instrumentos de investigación confiables y respaldados internacionalmente, toda la información que se obtuvo es de la base de datos ScienceDirect, además de haber seleccionado artículos procedentes de revistas científicas calificadas en Cuartil Q1.

3.9. Método de análisis de datos

El método de análisis involucra de manera formal el análisis de los artículos, centrados en: La técnica de Biomonitorio usando líquenes, Los parámetros de medición que se vinculan con la perturbación ambiental, y los entornos en los que se desarrolló el estudio.

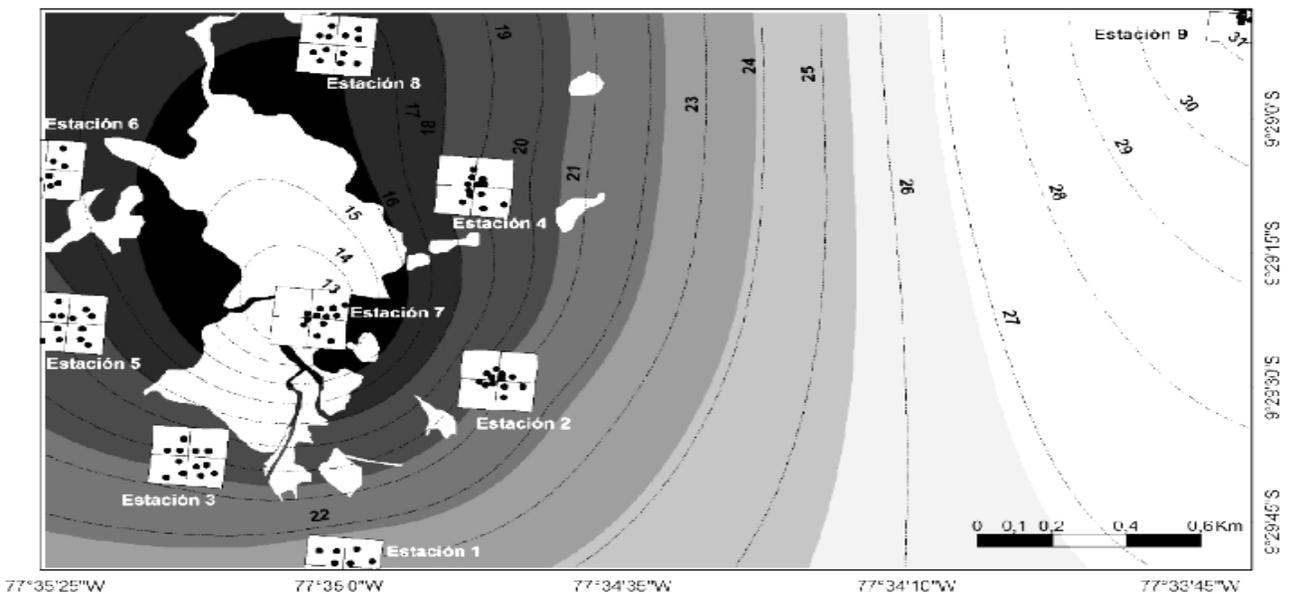
IV. RESULTADOS

Las dos técnicas de Biomonitorio usando Líquenes: empleando *líquenes nativos y trasplantes de líquenes*, son parte básica para llevar a cabo una investigación relacionada a la evaluación de la perturbación atmosférica. Las condiciones del área de estudio influenciaran en la decisión de usar cualquiera de las dos técnicas, ya que si el área esta desprovista totalmente de líquenes nativos, por el grado de contaminación por ejemplo, se optara por usar Trasplantes de Líquenes. El uso de Líquenes nativos se asoció al empleo de las métricas basadas en la Diversidad de Líquenes, diversidad taxonómica y diversidad funcional **(BENITEZ, Angel, et al, 2018) LUCHETA, Fabiane, et al, 2019) (DRESLER, Sławomir, et al, 2021) (CORREA-OCHOA, Mauricio Andres, et al, 2020) (VARELA, Z., et al, 2018)** y, además, enfocándose en relativamente pocas especies de líquenes nativos se hizo uso de métricas basadas en las respuestas fisiológicas y en la Bioacumulación. **(HUANG, Ying-ping, et al, 2019) (DRESLER, Sławomir, et al, 2021) (KLAPSTEIN, Sara J., et al, 2020) (AGNAN, Yannick; PROBST, Anne; SÉJALON-DELMAS, Nathalie, 2017) (SERRANO, Helena Cristina, et al, 2019) (PARVIAINEN, Annika, et al, 2019) (ROLA, Kaja, et al, 2019) (VANNINI, Andrea, et al, 2021)** Para el uso de Trasplantes de Líquenes, en todos los estudios revisados se evaluó la contaminación atmosférica comparando los valores de Parámetros Fisiológicos **(PAOLI, Luca, et al, 2018) (MALASPINA, P.; MODENESI, P.; GIORDANI, P. 2018) (ZHAO, Lili, et al, 2019)** y de Acumulación de contaminantes **(MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019) (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021)** de muestras de líquenes de un sitio de control con muestras de sitios contaminados, donde el sitio de control posee condiciones de estabilidad y sanidad ambiental y por ende los valores medidos también reflejan estabilidad en el desarrollo del liquen. En el estudio de PAOLI, Luca, et al, 2018 se trasladó muestras de liquen de un sitio remoto con condiciones ambientales normales, como sitio de control, a un sitio cercano a un vertedero donde se incineran residuos, y viceversa, líquenes procedentes de la cercanía al vertedero se trasladaron a la zona remota de condiciones ambientales normales, el objetivo de su estudio fue evaluar si en 12 meses de trasplante se reflejaban las condiciones ambientales en el liquen, enfocándose en métricas de

Bioacumulación y Parámetros fisiológicos. La elección de dos o más métricas para la evaluación de la contaminación atmosférica resultó una constante en la mayoría de artículos revisados, Parámetros fisiológicos y Bioacumulación fueron métricas que se complementaron con la finalidad de proporcionar información confiable que represente las condiciones ambientales de interés.

El IPA en el estudio VALDIVIA, Diego; RAMÍREZ, Ángel, 2018, donde se evaluaron zonas donde existe un pasivo ambiental minero, se implementaron 9 estaciones de monitoreo, una estación estaba en el centro del pasivo ambiental, y una estación estuvo más alejada, que fue la zona de control (zona con menor contaminación), las demás estaciones tenían una gradiente de alejamiento del centro del pasivo ambiental. El cálculo del IPA identificó a la estación que estaba en el centro como zona II según la clasificación IPA, donde describe que aún hay áreas de contaminación y siendo la presencia de líquenes bastante pobre. La estación de control estuvo clasificada en la zona III, esta tuvo los valores más altos entre todas las estaciones, bordeando a la zona IV, donde se considera que el aire está limpio y tiene condiciones favorables para el crecimiento de líquenes.

Figura. 6. Mapa de Isocontaminación de valores IPA



Fuente: VALDIVIA, Diego; RAMÍREZ, Ángel, 2018.

En la Figura 6, cada línea está representada con el valor IPA obtenido. La contaminación es inversamente proporcional al valor IPA, a más contaminación menor es el valor.

Relacionando **la diversidad de líquenes en especies y grupos funcionales** tenemos que el aumento de la cobertura urbana, la densidad demográfica y la flota vehicular influyen fuertemente en la en la composición de especies y grupos funcionales. **La expansión urbana y los cambios de vegetación** influyen en la calidad ambiental y ocasionan una homogenización de las especies liquénicas en las ciudades de todo el mundo, lo que produce una disminución de la densidad y riqueza de las especies en comparación de áreas rurales y naturales. La información sobre la cobertura y uso del suelo está ligada a las emisiones atmosféricas, la relevancia de usar esta información para verificar los cambios en las comunidades liquénicas puede explicarse en la estabilidad de esta variable, ya que a diferencia de las concentraciones de elementos contaminantes no es capaz de variar de forma momentánea en el tiempo. Tenemos que el **pH de las cortezas** de los árboles disminuye con la urbanización, la acidificación de la corteza arbolea es uno de los principales factores que perjudica a los líquenes, en el estudio de LUCHETA, Fabiane, et al, 2019 - donde se estudiaron sitios urbanos, suburbanos y rurales y su influencia en la diversidad de líquenes – la acidificación de la corteza de los árboles puede ser resultado de la flota vehicular y el tráfico de carreteras, adicionalmente emisiones de actividades industriales como lo es una refinería de petróleo, pudo haber contribuido a la acidificación de los forófitos a través de lluvia acida, el impacto de esta provoca cambios sobre todo en la vegetación. En el estudio mencionado, en relación con los grupos funcionales, la comunidad de líquenes en áreas urbanas estuvo relacionado con líquenes de talo lobulado angosto y folioso, estudios en Europa, han relacionado este tipo de biota con ambientes secos, como lo son los ambientes urbanizados, a los talos crustosos adheridos de forma suelta se les ha relacionado con ambientes con alta humedad, generalmente se desarrollan en cortezas húmedas, este tipo de liquen se ve favorecido para establecerse en zonas rurales rodeadas de vegetación conservada. (LUCHETA, Fabiane, et al, 2019)

En cuanto al **tipo de reproducción**, los líquenes con propágulos asexuales se desarrollan en ambientes de gran extensión debido a que poseen a los dos simbiosomas del líquen y no necesitan buscar al simbiosoma adecuado para su desarrollo. La reproducción por Soredia se relacionó con ambientes altamente y medianamente urbanizados, al ser ligeros, su dispersión puede ser a corta o larga distancia, en cambio la reproducción por Isidios o por fragmentación de talo, que poseen un tamaño mayor al poseer una capa de algas y hongos, su ventaja es aumentar el área del talo, además de poder realizar la fotosíntesis, están ligados a ambientes con menos luz, que es el caso de lugares con vegetación conservada. Los líquenes que tienen como **fotobionte a Trentepohlia**, se desarrollan en ambientes húmedos, volviéndose menos frecuentes en zonas de baja humedad porque su eficiencia fotosintética sufre estrés y se reduce, las áreas urbanas que se caracterizan por ambientes con menos humedad son ambientes hostiles para este tipo de fotobionte, a diferencia de los líquenes con **fotobiontes Clorococoides** que están adaptados a la desecación, este tipo de líquen es abundante y se encuentra por todo el mundo. Las zonas rurales poseen una mayor diversidad y riqueza de grupos funcionales de líquenes y se ha observado una disposición de muchas especies funcionales. (BENÍTEZ, Angel, et al, 2018) (LUCHETA, Fabiane, et al, 2019)

El uso de **Xanthoria parietina** como bioindicador se debe a su alta tolerancia y a su presencia común en Europa (PARVIAINEN, Annika, et al, 2019), (ROLA, Kaja, 2019) (OSYCZKA, Piotr, 2019) su característica foliosa hace que posea un nivel alto de contacto con los contaminantes atmosféricos permitiéndole una acumulación de metales en zonas contaminadas. PARVIAINEN, Annika, et al, 2019 cita por ejemplo estudios de Scerbo et al., 1999, Scerbo et al., 2002, Cuny et al. al, 2004 donde se deduce que la composición del talo de **X. parietina** refleja de manera confiable la composición química del aire que las rodea. En su estudio para analizar los cambios temporales en la concentración de elementos contaminantes, el análisis se hizo diferenciando la concentración en la parte vegetativa y la parte generativa del líquen, y tomando a dos grupos de forófitos, uno de ellos con antigüedad de 14 años trasplantados en una zona urbana y el otro grupo apenas trasplantado a una zona

urbana, resultando que por lo general se observaron acumulaciones más altas en las zonas vegetativas – talo, que en las zonas generativas – apotecios, a excepción del Zn, que se encontró en concentraciones altas en los apotecios. Las muestras del grupo donde el trasplante fue hace 14 años acumularon mayores cantidades de Pb, Cd, Ni y Cr, indicando que, a mayor tiempo de exposición a la contaminación, mayor es la cantidad de elementos xenobióticos en el talo del líquen. En este estudio se registró una tendencia al alza en la concentración de Pb, notando un aumento significativo de este elemento con el tiempo después de la reubicación, esto no se relacionó con la combustión de gasolina, ya que desde el 2004 se prohibió la gasolina con Pb, sino más bien con fuentes de emisión industriales, acerías de gran actividad del área de estudio. En cuanto a la **anatomía y morfología del líquen con relación a la contaminación**, se encontró que el espesor del córtex superior e inferior fueron relativamente mayores en las zonas donde la contaminación fue menor, la relación más pronunciada fue la del contenido de Zn y Cd con los espesores relativos de la corteza superior e inferior, a diferencia del Cu y Pb que no se relacionó con estos. Asimismo, al comparar las características anatómicas de los apotecios, se evidenció valores más altos en el grosor de este en las zonas menos contaminadas. El Zn, Ni y Cr se relacionaron con el grosor de la corteza superior y su concentración en las partes vegetativas, el espesor de la capa de algas se relacionó con el Ni, las concentraciones de plomo se relacionaron con el espesor de la capa de algas, medula y el talo completo. Se encontraron diferencias anatómicas diferenciadas en los 3 grupos de muestreo, por lo tanto, la capacidad de acumulación de elementos contaminantes de un espécimen no solo difiere entre especie si no también en las características fenotípicas del individuo. (PARVIAINEN, Annika, et al, 2019)

El acercamiento de líquenes a fuentes de emisión de contaminantes genera **cambios fisiológicos en los simbioses del líquen**. El contenido de Ácido Tiobarbiturico TBARS, que es un compuesto que está relacionado con la descomposición de ácidos grasos poliinsaturados producidos por la peroxidación de lípidos de la membrana celular del hongo, - la membrana celular de los hongos protege a la célula de varios tipos de estrés ambiental - habitualmente su elevada concentración es síntoma de

estrés por la exposición a metales y elementos tóxicos, el acercamiento de *F. caperata* a las proximidades de un vertedero en el estudio de PAOLI, Luca, et al, 2018, significó la elevada concentración de TBARS, adicionalmente el traslado de muestras de la zona del vertedero a la zona remota con moderada contaminación, significó la considerable baja de TBARS, que incluso alcanzó los niveles de las muestras nativas de la zona de moderada contaminación. El **contenido de Ergosterol** que también es un compuesto asociado al hongo, representa la viabilidad del hongo para poder desarrollarse de forma saludable ya que su producción adecuada significa un adecuado aprovechamiento de nutrientes, el contenido de Ergosterol se relaciona con la cantidad de células fúngicas metabólicamente activas y frente a la exposición del líquen a metales pesados, estos pueden reducir la integridad de las membranas celulares del hongo. En el estudio de PAOLI, Luca, et al, 2018 el contenido de este compuesto se elevó al ser trasladado a una zona de menor contaminación, igualando y superando el contenido de las muestras nativas en el periodo de 12 meses.

Consecuentemente, la reducción en la producción de TBARS y el aumento del contenido de Ergosterol se debería a condiciones ambientales mejoradas, esto en Muestras de líquenes previamente estresadas, no obstante, el retiro de una fuente contaminante no produce una mejora automática en los parámetros fisiológicos en este tipo de muestras, ya que los elementos acumulados de manera intracelular aún pueden producir efectos tóxicos. (PAOLI, Luca, et al, 2018) (PIOVÁR, J., et al, 2017)

Para los parámetros fisiológicos relacionados al Fotobionte, como lo es la **Fluorescencia de la clorofila, la relación de fluorescencia variable y fluorescencia máxima (Fv/Fm)** se utiliza para determinar situaciones de estrés de plantas superiores y líquenes, este indicador es sensible al daño por metales como por ejemplo con el Pb y Cd, esta métrica está relacionada con el funcionamiento del Sistema fotosintético II PSII. En el estudio de HUANG, Ying-ping, et al, 2019, al comparar las mediciones de Fv/Fm en diferentes áreas con diferentes intensidades de contaminación vehicular en las especies ***Usnea aciculifera* y *Usnea luridorufa***. *U. aciculifera* mostró variabilidad en este parámetro según la intensidad de contaminación de cada área estudiada, pero *U. luridorufa* no mostró variación. Esta variación –

disminución en los valores de la fluorescencia de la clorofila y se relacionó con la acumulación de metales como el Mn, Pb, Cd, Ni, en el primer líquen se obtuvieron el doble de acumulación de estos elementos que en el segundo, y las variaciones fueron más pronunciadas en el primero que en el segundo. *U. aciculifera* se mostró como mejor bioindicador de metales al demostrar mayor sensibilidad de la fluorescencia de la clorofila a la concentración de metales. La medición de este parámetro se puede realizar in situ y puede ser repetitivo, al no ser destructivo. (HUANG, Ying-ping, et al, 2019)

En el estudio realizado por PIOVÁR, J., et al, 2017 donde se sometió a muestras de líquenes *Xanthoria parietina* un tratamiento con metales en laboratorio durante 24, 48 y 72 hrs se observó que el efecto negativo de los contaminantes aumentó con el tiempo de exposición a estos, una disminución significativa en Fv/Fm se observó después de 48 hrs. Las muestras de líquenes que fueron expuestas en 72 hrs resultaron completamente afectadas, llegando a ser fatal este tiempo de exposición para el micobionte del líquen.

En PAOLI, Luca, et al, 2018, al trasladar líquenes provenientes de la periferia de un vertedero a una zona no contaminada, la degradación de Clorofila medida por la proporción de **OD435/OD415** señaló una mejora significativa al cabo de 12 meses, la concentración de la clorofila era aún más alta que las de los líquenes nativos de la zona no contaminada. Según los estudios comprendidos en esta revisión sistemática, habitualmente los valores de degradación de clorofila y de fluorescencia de clorofila son sensibles a la exposición de metales pesados, por esta razón se asocian los parámetros de bioacumulación con métricas relacionadas a las respuestas fisiológicas del líquen, proporcionando variedad de información para obtener resultados que detallen de forma confiable la perturbación ambiental.

Los líquenes al tener un valor nutricional, son dieta de algunos animales silvestres, tal es el caso de *Rhinopithecus roxellana*, o mono de nariz chata de Sichuan, el riesgo del consumo de líquenes, según los resultados del estudio, provendría de los metales como Cd y Pb, el contenido elevado de estos metales significaría riesgo para la salud de los monos. El Cd y Pb son metales pesados tóxicos y no tienen función biológica y

también son acumulativos. *U. luridorufa* al poseer valores bajos en concentraciones de estos metales sería la fuente más segura de alimentación para los monos, a diferencia de la otra especie de líquen, que mostró una concentración elevada de metales. (HUANG, Ying-ping, et al, 2019)

De Forma amplia, los **líquenes son utilizados como bioindicadores** de la contaminación del aire por metales, estos son capaces de acumular metales a lo largo del tiempo, lo que los convierte en herramientas válidas para evaluar la calidad del aire y determinar posibles fuentes de elementos contaminantes. Los líquenes se han utilizado exitosamente para evaluar áreas contaminadas por minería, áreas industriales, proximidades de vertederos e incineradores de residuos y áreas urbanas. A comparación de los medidores fisicoquímicos de las estaciones meteorológicas que nos proporcionan mediciones instantáneas, los líquenes registran una resistencia a los contaminantes a largo plazo. La especie de Líquen *Xanthoria parietina*, es una especie toxitolerante, que se ha utilizado exitosamente por el mundo como bioindicador de perturbación ambiental por metales, en estudios donde se le utilizó, en ella no se encontraron síntomas de estrés fisiológico ni anatómico en su talo debido a la acumulación por metales. En el estudio de PARVIAINEN, Annika, et al, 2019, donde se evaluó la calidad del aire y la distribución espacial de los contaminantes con la especie *Xantoria parietina*, esta especie resultó una buena opción al no presentar estrés frente a la contaminación por metales, y su composición elemental se correlacionó de forma positiva con la composición de material particulado procedente de la fuente de contaminación, datos facilitados por estaciones de medición. Una condición a analizar, es que la edad y el tamaño de este tipo de líquen influye en la **acumulación de metales**, se ha demostrado que en las partes vegetativas del líquen se ha encontrado en mayor proporción metales como Cd, Cr, Ni y Pb a comparación de sus apotecios que exhibe una mayor concentración de Zn. La distribución de los metales en el talo de este líquen depende de la edad de líquen, las partes centrales que son más antiguas, contienen altas concentraciones metálicas a comparación con las partes más jóvenes, que son las partes periféricas, adicionalmente Al utilizar a *Xanthoria parietina* en áreas urbanas, esto conlleva a limitarse a áreas verdes, el

tamaño y la cantidad de estos pueden ser pequeños, en ese sentido, el muestreo debe ser lo más homogéneo y representativo. A pesar de haber obtenido muestras menores a 1 cm en las áreas periféricas a un polígono industrial en el estudio mencionado, estas muestras fueron las más enriquecidas en elementos metálicos, lo que demuestra que, bajo exposición, el tamaño del líquen no influye en la acumulación de metales. (PARVIAINEN, Annika, et al, 2019)

En el estudio de MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019, donde se comprobó la confiabilidad del líquen *Evarnia prunastri* para la evaluación de la variabilidad espacial de los componentes de material particulado PM, en el centro de Italia, área ampliamente contaminada por tráfico vehicular, calefacción domiciliaria y fuentes de emisión de partículas industriales. La especie de líquen se recolectó de una zona no contaminada y se trasplanto a la zona de estudio, estas se colocaron junto a un **Muestreador de Alta Resolución Espacial HSRS**, dispositivo que asegura la recolección de PM a largo plazo (uno a dos meses) en filtros de membrana, estas muestras son adecuadas para análisis posteriores. El análisis del muestreo se dio en 2 episodios, T1 = 5 meses después del trasplante y T2 = 13 meses después del trasplante, teniendo a T0 = mediciones de control. Se pudo construir una red extensa de monitoreo de bajo costo en el área de estudio. Los datos de la bioacumulación resultaron confiables para las emisiones en altas concentraciones provenientes de una planta siderúrgica. Cr, Mo, Nb, Ni y bastante confiable para las concentraciones de As, Co, Fe, Mn, W en los dos periodos de muestreo. En general los líquenes trasplantados resultaron ser confiables para los elementos emitidos en altas concentraciones y en sitios más cercanos a las fuentes de emisión, como la planta siderúrgica (Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Nb, Ni, Ti y W), y la red ferroviaria (Cu, Sn, Sb), menos confiables para los elementos emitidos en bajas concentraciones, como la calefacción domiciliaria (Ba, Bi, Cd, Cs, Mg, Pb, Rb y Tl). Además, a los líquenes que fueron expuestos a elementos de PM10 específicamente altas, parecían estar en condiciones de estrés, esto lo llevo a ser menos selectivo en la acumulación de elementos, comportamiento que amerita más investigación. A continuación, se ilustra la figura 7 con los gráficos resultantes de la comparación de las mediciones HSRS y las mediciones obtenidas en las muestras de los líquenes para

los metales Mo, Cr y Cu, esta comparación fue la más representativa al demostrar la similitud en las mediciones. (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019)

Figura. 7. Comparación de las mediciones de Mo, Cr y Cu de líquenes y muestreadores



HSRS

Comparación de la acumulación de Mo, Cr y Cu en muestras de líquenes después de cinco meses (T1) y trece meses (T2) de exposición con sus concentraciones medias medidas en PM 10 durante cinco (HSRS T1) y trece (HSRS T2) meses.

Para el estudio de PAOLI, Luca, et al, 2018, usando *F. caperata* que se recolectaron cercanas al **vertedero** (Grupo 1) y se trasplantaron a la zona remota con contaminación moderada (Grupo 2) durante 12 meses, antes del traslado de estas muestras, estas poseían una condición de acumulación elemental muy alta para el Cr, alta para Cu, Fe y Zn, moderada para Cd y Pb y baja para As, las muestras del grupo 2 indicaron contaminación moderada para Cr y muy baja para los demás elementos. Las muestras del Grupo 1 disminuyeron considerablemente cuando fueron trasladadas al área con menos contaminación, sin embargo, la acumulación de metales continuó siendo mayor comparadas con las muestras nativas. Por otra parte, las muestras trasladadas a la zona cercana al vertedero lograron alcanzar las condiciones de las muestras contaminadas. 12 meses de recuperación de los trasplantes contaminados no fueron suficientes para igualar las condiciones de los líquenes nativos de área no contaminada. Las muestras limpias trasladadas al lugar contaminado acumularon hasta el 80% de contenido metálico en muestras contaminadas. Por consiguiente, podemos proponer que el tiempo de integración de elementos metálicos en el líquen es menor al tiempo de recuperación que tuvieron las muestras contaminadas expuestas a una contaminación baja.

El tiempo de integración del Azufre S, fue comparable al usar las dos especies de líquen *Flavopunctelia soledica* y *Rhizoplaca chrysoleuca* (las dos especies del tipo Folioso), la tendencia temporal en la concentración de S alcanzo los 6 meses de exposición, coincidiendo con el periodo de invierno en la zona, donde los niveles de contaminación fueron elevados. Esta tendencia coincide también con los niveles de SO₂ atmosférico, situación que implicaría que el SO₂ es una fuente importante de S atmosférico. Estas variedades de líquen nos dan información valida sobre la concentración de SO₂ en la atmosfera. La combustión del carbón en la calefacción y para la cocina doméstica, en china, ha contribuido para los eventos severos de contaminación en China. A su vez, la rápida reducción de S, fue mayor a 3 meses, y se relacionó con el término del invierno. Sin embargo, la concentración de S en los líquenes, fue mayor que las concentraciones medidas antes de la exposición, por lo que estaría relacionado con la Disposición Atmosférica de SO₂ y demás compuestos

que contienen S. De igual forma, el tiempo de integración de los metales en las dos especies de líquenes estuvo relacionada. La concentración de elementos metálicos alcanzó su punto máximo a los 9 meses de exposición en los sitios cercanos a la carretera donde la densidad vehicular fue considerable, y a los 12 meses en los sitios alejados de la carretera. La creciente acumulación de metales en líquenes está relacionada al tráfico vehicular, a través de la combustión de combustibles fósiles, fricción de neumáticos, pastillas de freno, aceites, aditivos los vehículos pueden emitir Cd, Cu, Fe, Pb, Ni, Sb, V y Zn. Estos resultados nos indican que FS y RC resaltan la aplicabilidad y comparabilidad de los dos líquenes como Biomonitores de la deposición de elementos atmosféricos en regiones altamente contaminadas. (ZHAO, Lili, et al, 2019).

En esta revisión sistemática, resultó que la aplicación del Biomonitorio usando Líquenes se utilizó en variedad de áreas, todas estas con un significativo interés investigativo acerca de las condiciones atmosféricas y su contaminación, demostrando su adaptabilidad a diferentes entornos, se encontraron artículos donde las áreas de estudio fueron: **Área industrial contaminada** (BOONPENG, Chaiwat, et al, 2018) , (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019) (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021) (PINHO, P., et al, 2017) (MALASPINA, P.; MODENESI, P.; GIORDANI, P, 2018) (KLAPSTEIN, Sara J., et al, 2020) (SERRANO, Helena Cristina, et al, 2019) (ROLA, Kaja, et al, 2019) (ROLA, Kaja; OSYCZKA, Piotr, 2019), **Áreas con influencia natural y urbana, donde se midió el nivel de antropopresión** (LUCHETA, Fabiane, et al, 2019) (DRESLER, Sławomir, et al, 2021), **Centros urbanos con importantes fuentes de contaminación** (VARELA, Z., et al, 2018) (CORREA-OCHOA, Mauricio Andres, et al, 202) (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2019) (MARIÉ, Débora C., et al, 2018) (MASSIMI, Lorenzo, et al, 2021) (MANNINEN, Sirkku, 2018) (ZHAO, Lili, et al, 2019) (PARVIAINEN, Annika, et al, 2019), **Áreas naturales con influencia de tráfico vehicular elevado** (HUANG, Ying-ping, et al, 2019), **Áreas cercanas a vertederos** (PAOLI, Luca, et al, 2018) (SUJETOVIENÉ, Gintarė, et al, 2019), **Áreas naturales y boscosas con perturbación antropogénica** (BENÍTEZ, Angel, et al, 2018) (AGNAN,

Yannick; PROBST, Anne; SÉJALON-DELMAS, Nathalie, 2017) (VANNINI, Andrea, et al, 2021) (KŁOS, Andrzej, et al, 2018).

V. CONCLUSIONES

1. Las técnicas aplicadas, el uso de Líquenes nativos de la zona de estudio, así como la utilización de Trasplantes de Líquenes a la zona de interés, resultaron eficientes para demostrar contaminación del aire. El uso de líquenes nativos se utilizó con mayor frecuencia para evaluar la contaminación de una zona utilizando las métricas enfocadas a la Diversidad de Líquenes (abundancias de especies y diversidad funcional), y el uso de Trasplantes de Líquenes, técnica usada en áreas donde existe ausencia de líquenes por condiciones ambientales naturales o por contaminación, se asoció a métricas basadas en Bioacumulación y en Respuestas Fisiológicas del liquen frente a la contaminación.
2. La elección de métricas o parámetros para evaluar la contaminación ambiental usando líquenes dependerá del análisis y comprensión del factor contaminante, una intensidad baja de este facto afectaría de forma individual el desempeño del liquen, el mejor parámetro a usar sería el relacionado a la respuesta fisiológica del liquen como individuo, si el factor impactante es de intensidad media podría afectar a la capacidad ecológica del liquen, provocando cambios en la abundancia de la especie, tanto en número de especies como en grupos funcionales, esto en especies sensibles, antes que tolerantes, y si el factor impactante es de intensidad alta, podría afectar en la pérdida de especies, pudiendo reflejar una medición basada en diversidad taxonómica.
3. Al ser cosmopolitas y estar dispersos por todo el mundo, los líquenes resultaron ser adaptables a todos los ambientes que se usaron como bioindicadores, en áreas contaminadas por fuentes como el tráfico vehicular, calefacción y/o exigencia de energía en centros urbanos, industriales, mineras, vertederos respondieron de forma positiva para reflejar la contaminación del aire.

VI. RECOMENDACIONES

1. De acuerdo con la información expuesta, se recomienda que de manera continua y a nivel nacional, se haga empleo de los líquenes como bioindicadores, por todas las condiciones que nos ofrece como herramientas poderosas para poder evaluar la contaminación ambiental.
2. Las estaciones de monitoreo en el Perú no están distribuidas de forma eficaz dentro de todo su territorio, al poseer riqueza en biodiversidad, se recomendaría el uso de bioindicadores como complemento de las redes de monitoreo tradicionales y poder implementar redes amplias de monitoreo ambiental, al tener adaptabilidad a cualquier zona, sea urbana, industrial o natural, al ser herramientas de bajo costo y su manejo sea relativamente sencillo, tendríamos un panorama más amplio de la calidad del aire en zonas de interés.
3. Se recomienda que los gobiernos dentro del territorio peruano sean los impulsores de esta herramienta, su investigación, la implementación de metodologías para su uso, y las políticas de control de contaminación enfocadas en su empleo, garantizaría un seguimiento verdadero a la contaminación atmosférica.

REFERENCIAS

1. AGNAN, Yannick; PROBST, Anne; SÉJALON-DELMAS, Nathalie. Evaluation of lichen species resistance to atmospheric metal pollution by coupling diversity and bioaccumulation approaches: A new bioindication scale for French forested areas. *Ecological Indicators*, 2017, vol. 72, p. 99-110. DOI 10.1016/j.ecolind.2016.08.006
2. ARROYO SÁNCHEZ, José Antonio. Los líquenes como bioindicadores de presencia de metales pesados en ecosistemas de montaña: experiencia en la Cordillera Blanca, Ancash-Perú. 2022. Disponible en: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/5249>
3. BOONPENG, Chaiwat, et al. Assessing atmospheric pollution in a petrochemical industrial district using a lichen-air quality index (LiAQI). *Ecological indicators*, 2018, vol. 95, p. 589-594. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.08.012.
4. BENÍTEZ, Angel, et al. Functional traits of epiphytic lichens in response to forest disturbance and as predictors of total richness and diversity. *Ecological indicators*, 2018, vol. 86, p. 18-26. DOI 10.1016/j.ecolind.2017.12.021
5. CORREA-OCHOA, Mauricio Andres, et al. Evaluation of the Index of Atmospheric Purity in an American tropical valley through the sampling of corticolous lichens in different phorophyte species. *Ecological Indicators*, 2020, vol. 115, p. 106355. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.106355
6. DRESLER, Sławomir, et al. Allantoin content in lichens depends on anthropopressure level. *Ecological Indicators*, 2021, vol. 124, p. 107312. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.107312
7. GEISER, Linda H., et al. Lichen-based critical loads for deposition of nitrogen and sulfur in US forests. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 291, p. 118187. DOI 10.1016/j.envpol.2021.118187

8. HUANG, Ying-ping, et al. Lichen as a biomonitor for vehicular emission of metals: a risk assessment of lichen consumption by the Sichuan snub-nosed monkey (*Rhinopithecus roxellana*). *Ecotoxicology and environmental safety*, 2019, vol. 180, p. 679-685. DOI 10.1016/j.ecoenv.2019.05.047
9. HAWKSWORTH, David L.; ITURRIAGA, Teresa; CRESPO, Ana. Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de micología*, 2005, vol. 22, no 2, p. 71-82. DOI 10.1016/S1130-1406(05)70013-9
10. KLAPSTEIN, Sara J., et al. Spatial distribution of mercury and other potentially toxic elements using epiphytic lichens in Nova Scotia. *Chemosphere*, 2020, vol. 241, p. 125064. DOI 10.1016/j.chemosphere.2019.125064
11. KŁOS, Andrzej, et al. Using moss and lichens in biomonitoring of heavy-metal contamination of forest areas in southern and north-eastern Poland. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 627, p. 438-449. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.01.211
12. LEBLANC, SC Fabius; SLOOVER, Jacques De. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian journal of botany*, 1970, vol. 48, no 8, p. 1485-1496. DOI 10.1139/b70-224
13. LUCHETA, Fabiane, et al. Lichens as indicators of environmental quality in southern Brazil: An integrative approach based on community composition and functional parameters. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 107, p. 105587. DOI 10.1016/j.ecolind.2019.105587
14. MALASPINA, P.; MODENESI, P.; GIORDANI, P. Physiological response of two varieties of the lichen *Pseudevernia furfuracea* to atmospheric pollution. *Ecological Indicators*, 2018, vol. 86, p. 27-34. DOI 10.1016/j.ecolind.2017.12.028
15. MANNINEN, Sirkku. Deriving nitrogen critical levels and loads based on the responses of acidophytic lichen communities on boreal urban *Pinus sylvestris* trunks. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 613, p. 751-762. DOI 10.1016/j.scitotenv.2017.09.150

16. MARIÉ, Débora C., et al. Atmospheric pollution assessed by in situ measurement of magnetic susceptibility on lichens. *Ecological Indicators*, 2018, vol. 95, p. 831-840. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.08.029.
17. MASSIMI, Lorenzo, et al. Lichen transplants as indicators of atmospheric element concentrations: a high spatial resolution comparison with PM10 samples in a polluted area (Central Italy). *Ecological Indicators*, 2019, vol. 101, p. 759-769. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.12.051.
18. MASSIMI, Lorenzo, et al. Lichen transplants for high spatial resolution biomonitoring of Persistent Organic Pollutants (POPs) in a multi-source polluted area of Central Italy. *Ecological Indicators*, 2021, vol. 120, p. 106921. DOI 10.1016/j.ecolind.2020.106921.
19. PACYNA, J. M. Atmospheric deposition. 2008. DOI 10.1016/j.atmosenv.2008.09.066
20. PAOLI, Luca, et al. One year of transplant: is it enough for lichens to reflect the new atmospheric conditions?. *Ecological Indicators*, 2018, vol. 88, p. 495-502. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.01.043
21. PARVIAINEN, Annika, et al. Lichens as a spatial record of metal air pollution in the industrialized city of Huelva (SW Spain). *Environmental Pollution*, 2019, vol. 253, p. 918-929. DOI 10.1016/j.envpol.2019.07.086
22. PINHO, P., et al. Using nitrogen concentration and isotopic composition in lichens to spatially assess the relative contribution of atmospheric nitrogen sources in complex landscapes. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 230, p. 632-638. DOI 10.1016/j.envpol.2017.06.102
23. PIOVÁR, J., et al. Short-term influence of Cu, Zn, Ni and Cd excess on metabolism, ultrastructure and distribution of elements in lichen *Xanthoria parietina* (L.) Th. Fr. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, vol. 145, p. 408-419. DOI 10.1016/j.ecoenv.2017.07.063

24. QUISPE, Katherine; ÑIQUE, Manuel; CHUQUILIN, Edilberto. Líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en la ciudad de Tingo María, Perú. *RevIA*, 2018, vol. 3, no 2. ISSN 2224-445X. Disponible en: <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/viewFile/90/74>.
25. ROLA, Kaja, et al. Heavy-metal tolerance of photobiont in pioneer lichens inhabiting heavily polluted sites. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 679, p. 260-269. DOI 10.1016/j.scitotenv.2019.05.002
26. ROLA, Kaja; OSYCZKA, Piotr. Temporal changes in accumulation of trace metals in vegetative and generative parts of *Xanthoria parietina* lichen thalli and their implications for biomonitoring studies. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 96, p. 293-302. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.09.004
27. SERRANO, Helena Cristina, et al. Measuring and mapping the effectiveness of the European Air Quality Directive in reducing N and S deposition at the ecosystem level. *Science of the total environment*, 2019, vol. 647, p. 1531-1538. DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.08.059
28. SUJETOVIENĖ, Gintarė, et al. Metal accumulation and physiological response of the lichens transplanted near a landfill in central Lithuania. *Waste Management*, 2019, vol. 85, p. 60-65. DOI 10.1016/j.wasman.2018.12.017
29. TINOCO CUENCA, N., CAJAS PALACIOS, M. y SANTOS JIMÉNEZ, O., 2018. Diseño de investigación cualitativa. *TÉCNICA Y MÉTODOS 45 CUALITATIVOS PARA LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA* [en línea], no. 9, pp. 1689-1699. ISSN 1098-6596. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/12501>
30. TOVAR, Doraliza; AGUINAGA, Rafael. Los líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica, en Lima Metropolitana. *Revista de química*, 1994, vol. 8, no 2, p. 135-152. Disponible en: <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5532/5528>

31. VARELA, Z., et al. Changes in epiphytic lichen diversity are associated with air particulate matter levels: The case study of urban areas in Chile. *Ecological Indicators*, 2018, vol. 91, p. 307-314. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.04.023
32. VANNINI, Andrea, et al. Lichens as monitors of the atmospheric deposition of potentially toxic elements in high elevation Mediterranean ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2021, vol. 798, p. 149369. DOI 10.1016/j.scitotenv.2021.149369
33. VALDIVIA, Diego; RAMÍREZ, Ángel. Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en el pasivo ambiental minero Santo Toribio, Áncash, Perú. *The Biologist (Lima)*, 2018, vol. 16, no 1. DOI 10.24039/rtb2018161223
34. ZHAO, Lili, et al. Element bioaccumulation in lichens transplanted along two roads: The source and integration time of elements. *Ecological Indicators*, 2019, vol. 99, p. 101-107. DOI 10.1016/j.ecolind.2018.12.020

ANEXOS

Anexo 01: Matriz Apriorística

Objetivos Específicos	Problemas específicos	Categoría	Subcategoría	Criterios
Determinar las técnicas de Biomonitorio utilizando Líquenes	¿Qué técnicas de Biomonitorio utilizando Líquenes podemos aplicar?	Técnicas de Biomonitorio Liquénico	Uso de Flora nativa Uso de Liquen Trasplantado	1.Credibilidad de la fuente de la información. 2.Tipo y diseño de investigación.
Determinar que parámetros de medición evidencian perturbación en el entorno.	¿Qué parámetros de medición podemos analizar usando líquenes como bioindicadores?	Parámetros de medición	Cambios Fisiológicos. Distribución de la Diversidad. Cambios Morfológicos. Bioacumulación	3.Uso de líquenes como bioindicadores 4. Artículos por técnica de Biomonitorio. 5.Area espacial monitoreo.
Evaluar la adaptabilidad del Biomonitorio con líquenes a diferentes entornos.	¿El Biomonitorio con líquenes es un método adaptable a diferentes entornos?	Entorno a Biomonitorio	Entornos Urbanos Entornos Industriales Vertederos Entornos Naturales	6. Contaminante analizado. 7. Correlación de tiempo

Tabla 6.Matriz Apriorística.