



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO

**Líquenes como bioindicadores de la calidad del
aire**

Autor: Ana Pardo González

Tutor: Leopoldo García Sancho

Convocatoria: Febrero 2017

RESUMEN

Las características de los líquenes: ciclo de vida largo, amplia distribución, escasa movilidad, capacidad para acumular contaminantes atmosféricos, muestreo fácil, bajo costo y posibilidad de monitorizar amplias áreas, los convierten en buenos bioindicadores de la calidad del aire. Esto ha hecho que su uso en estudios medioambientales haya crecido de forma exponencial durante las últimas décadas, convirtiéndose en útiles señales de alarma en la detección de alteraciones de la calidad atmosférica. La biomonitorización de líquenes se basa en la observación de las comunidades liquénicas siendo la desaparición de líquenes, la disminución de la frecuencia de aparición y de la diversidad o las alteraciones morfológicas señales importantes de alteración atmosférica. Los compuestos gaseosos que afectan a estos organismos son, entre otros, el dióxido de azufre, los compuestos de nitrógeno, los metales, los fluoruros, el polvo alcalino, los hidrocarburos clorados, etc. En este trabajo bibliográfico se recoge información que avala que la calidad del aire (medida mediante la biomonitorización de líquenes) es peor en aquellas zonas con un elevado tránsito de vehículos, como los centros urbanos, o en zonas con una elevada industrialización.

ABSTRACT

The characteristics of lichens such as: long life cycle, wide distribution, low mobility, ability to accumulate air pollutants, easy sampling, low cost and the possibility of monitoring large areas make them good bioindicators of air quality. This has made its use in environmental studies during the last decades have grown exponentially, becoming useful warning signs of poor atmospheric quality. The biomonitorization of lichens is based on the observation of lichen communities, with the disappearance of lichens, declining numbers, species diversity or morphological alterations, signals of altered air quality. Among the gaseous compounds that affect these organisms are sulfur dioxide, nitrogen compounds, metals, fluorides, alkaline dust, chlorinated hydrocarbons, etc. In this bibliographical work, information has been collected that supports the fact that air quality (measured by the biomining of lichens) is worse in areas with high vehicular traffic, such as urban centers, or in areas with high industrialization.

INTRODUCCIÓN

El uso de organismos cosmopolitas para evaluar la contaminación ha aumentado notablemente en las últimas décadas. Estos organismos captan contaminantes ambientales y pueden utilizarse como indicadores de la biodisponibilidad de un contaminante a lo largo del tiempo, permitiendo, en algunos casos, una comparación entre los niveles de contaminación en diferentes áreas geográficas ⁽¹⁾

Un organismo se considera bioindicador cuando puede ser utilizado para la identificación y determinación cualitativa de factores contaminantes en la atmósfera ⁽²⁾. Muchas especies son incapaces de adaptarse a los cambios ambientales, de modo que su ausencia, es un indicio del problema. ⁽³⁾

El primer conocimiento que se tuvo de los líquenes como bioindicadores data del S.XIX. Sin embargo, hasta 1960 (año en el que se identificó el dióxido de azufre como el principal factor que afecta el crecimiento, distribución y salud de los líquenes) no se produjo el crecimiento exponencial de los estudios que utilizaban estos organismos como indicadores ⁽²⁾

El éxito de la utilización de líquenes en este campo se explica por:

- Están ampliamente distribuidos pudiendo encontrarse en la mayoría de ecosistemas terrestres, incluso en centros urbanos. Además, crecen en las superficie de los más diversos sustratos tanto inertes como orgánicos ⁽²⁻⁵⁾. Muchos líquenes tienen amplios rangos geográficos, permitiendo el estudio de gradientes de contaminación en amplias áreas. ⁽⁶⁾
- No poseen una cutícula protectora, un sistema vascular ni raíces, por lo que absorben nutrientes y contaminantes directamente por deposición atmosférica. Por lo tanto, los niveles de contaminantes en el talo del liquen provienen principalmente de la atmósfera. ^(2, 4,5,7,8,9)
- Presentan una naturaleza simbiótica, por lo que si cualquiera de los simbiosomas se ve afectado por un contaminante, ambos organismos mueren ⁽²⁾
- Son organismos longevos de crecimiento lento, lo que hace que estén expuestos a componentes nocivos durante largos periodos de tiempo ^(2,3,5,6)
- Son organismos perennes ^(2,4,7)
- Presentan muestreo fácil, bajo costo y, si las condiciones del área de estudio lo permiten la posibilidad de monitorizar amplias áreas ^(4,7) en cualquier estación. ⁽⁶⁾ Los líquenes, por lo

tanto, particularmente las especies comunes, podrían ser una alternativa o complemento a los métodos instrumentales para los estudios de contaminación atmosférica ⁽⁵⁾

- Tienen una gran capacidad para acumular contaminantes del aire, al ser capaces de almacenar contaminantes atmosféricos persistentes. ^(5,7,9) Se suele suponer que los elementos adquiridos por los líquenes representan alguna fracción de los elementos presentes en su entorno inmediato.⁽⁸⁾

Estas características no se dan simultáneamente en otros organismos de comparable sensibilidad, lo que convierte a los líquenes en valiosos bioindicadores de la contaminación ambiental, el cambio climático y la continuidad ecológica, siendo las muestras biológicas más utilizadas para este fin. ^(2,4,6,7)

Los líquenes pueden usarse como bioindicadores y/o biomonitores de varias maneras diferentes ^(1,6):

1. Cartografiando todas las especies presentes en un área determinada. Los ambientes pueden ser caracterizados por la cobertura, abundancia y frecuencia de especies liquénicas de tres grupos ecológicos: especies neutrófilas, nitrófilas y acidófilas ⁽¹⁰⁾.
2. Mediante el muestreo individual de las diferentes especies y la medida de la concentración de los contaminantes presentes en el talo.
3. Trasplantando los líquenes de una zona no contaminada a una zona contaminada y posteriormente observando las modificaciones morfológicas, evaluando parámetros fisiológicos y/o evaluando la concentración de contaminantes.

Sin embargo, Sigal (1988) afirma que los líquenes pueden ser útiles como bioindicadores, pero no como biomonitores, es decir, presentan síntomas de lesión cuando se exponen a contaminantes fitotóxicos, pero no permiten la predicción de las concentraciones exactas de contaminantes.⁽¹¹⁾

El mapeo de especies liquénicas presentes en grandes ciudades permitió diferenciar zonas de distinta calidad del aire en función de la presencia o ausencia de líquenes o de la estructura de los talos de las especies presentes. Las especies *Lecanora conizaeoides*, *Scoliciosporum chlorococcum*, *Amandinea punctata*, *Hyperphyscia variabilis*, *Hyperphyscia endochrysea* Mober, *Physcia undulada* o *Phaeophyscia orbicularis* se mostraron las más tolerantes a los contaminantes atmosféricos; mientras que *Lobaria pulmonaria*, *Lobaria amplissima*,

Ramalina ecklonii o especies pertenecientes a *Usnea* se encontraron entre las más sensibles.
(2,3)

En general, la sensibilidad a la contaminación atmosférica aumenta entre las formas de crecimiento siguiendo el patrón: crustáceo < foliáceo < fruticuloso, aunque hay excepciones a esta gradación. ⁽⁶⁾

Al utilizar los líquenes como bioindicadores de contaminación, se relaciona la presencia o ausencia de especies, su número, su frecuencia de aparición, su cobertura y los síntomas de daño externo o interno con el grado de pureza de la atmósfera.⁽¹²⁾ Los ambientes se caracterizan en función de tres grupos ecológicos: especies neutrófilas, nitrófilas y acidófilas. El predominio de uno de estos grupos es indicador de las características del ambiente afectado. ⁽³⁾

En los estudios realizados hasta la fecha se han descrito una serie de efectos que la contaminación puede ejercer sobre los líquenes. A nivel general, los investigadores han descrito disminuciones en el tamaño del talo y la fertilidad, blanqueo y convolución del talo, restricción de líquenes a la base de los árboles y mortalidad de especies sensibles. Los efectos microscópicos y moleculares incluyen la reducción del número de células de algas en el talo, cambios ultraestructurales del talo, cambios en los parámetros de fluorescencia de clorofila, degradación de pigmentos fotosintéticos y alteración del balance fotosíntesis/respiración. ⁽⁶⁾

Líquenes epífitos

Dentro de los líquenes, son los epífitos los que se utilizan en mayor medida en estudios de biomonitorización. Estos son muy sensibles a la contaminación del aire, ya que se encuentran por encima del suelo, por lo que suelen recibir una mayor exposición a los contaminantes del aire y no tienen acceso los nutrientes del suelo ⁽⁶⁾. Además, su unión al sustrato es pronunciada para que la superficie foliar permanezca intacta ⁽²⁾.

Las alteraciones en la calidad del aire afectan directamente a la diversidad del líquen que se utiliza generalmente como un indicador de sensibilidad de los efectos biológicos de los contaminantes atmosférico ^(3,7)

OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo bibliográfico de fin de grado son poner de manifiesto la importancia de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire así como su utilidad en estudios de biomonitorización mediante el trazado de mapas.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó una búsqueda bibliográfica de los estudios publicados en las bases de datos PubMed (NCBI) y Google Academic, utilizando las palabras clave “lichen”, “air” y “pollution” con el fin de conocer la importancia de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire así como su utilidad en estudios ambientales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En general, las técnicas para valorar la contaminación son costosas, por lo que la utilización de líquenes como biomonitores se generaliza cada vez más. Éstos permiten valorar los niveles de contaminación en grandes áreas actuando como señales de alarma, ⁽²⁾ lo que hace que se definan como "sistemas permanentes de control" para la evaluación de la contaminación del aire. ⁽¹⁾

Actualmente se conoce que, además del dióxido de azufre, una amplia gama de otros compuestos (amoníaco, fluoruros, el polvo alcalino, metales, hidrocarburos clorados, etc.), así como la eutrofización y la lluvia ácida, pueden ser detectados y monitorizados utilizando líquenes. ⁽²⁾

Como ya se ha visto, la ausencia/desaparición de líquenes es un indicativo de mala calidad del aire. Esta desaparición se debe, en la mayoría de los casos a que los líquenes absorben contaminantes gaseosos como el dióxido de azufre, fluoruros, ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y otros contaminantes gaseosos que emanan de las diferentes fuentes de contaminación ^(2,3,13). Sin embargo el ozono y los óxidos de nitrógeno, parecen tener en general una importancia relativamente menor en la desaparición de los líquenes. ⁽²⁾

Los sulfitos, nitritos y bisulfitos son directamente tóxicos para los líquenes, los compuestos ácidos afectan a los líquenes de tres maneras: toxicidad directa del ion H^+ , fertilización por NO_3^- y acidificación de los sustratos de corteza. ⁽⁶⁾

El tiempo de permanencia de los contaminantes y nutrientes en el talo del liquen difiere entre los elementos. Los macronutrientes como el nitrógeno, el azufre, el potasio, el magnesio y el calcio son comparativamente móviles y fácilmente lixiviados, por lo que pueden producirse cambios importantes en las concentraciones durante semanas o meses con cambios estacionales en la deposición. Los metales tóxicos como el cadmio, el plomo y el zinc están más estrechamente ligados o secuestrados dentro de los líquenes y, por lo tanto, son liberados más lentamente. ⁽⁶⁾

En Estados Unidos, el programa de Inventario y Análisis Forestal y el programa de Vigilancia de la Salud Forestal usan las comunidades de líquenes como indicadores de la calidad del aire y el cambio climático en la mayoría de los parques forestales. ⁽⁶⁾

Un ejemplo de estudio de biomonitorización con líquenes es el llevado a cabo por Sáenz, A. E. & Flores en Costa Rica en 2007 donde se observa una similitud entre las especies encontrada en el campus Universitario Rodrigo Facio y en el Parque Nacional, en su mayoría líquenes foliáceos, en contraposición a las estaciones de San José Central, que presentan otro tipo de líquenes, predominantemente crustáceos. En Los Yoses se puede observar una situación intermedia. ⁽¹³⁾

La mayor contaminación en las zonas de San José central y los Yoses podría explicarse como consecuencia del mayor tráfico de vehículos especialmente de vehículos antiguos, que aportan una mayor cantidad de contaminantes a la atmosfera. ⁽¹³⁾

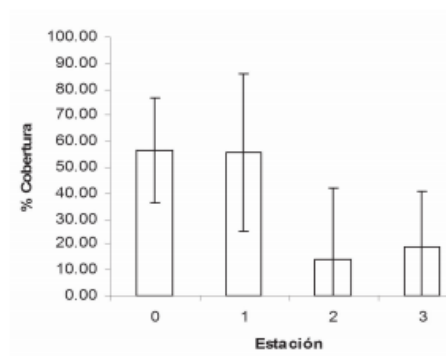


Figura 1. La cobertura promedio de líquenes foliosos (con desviación estándar) según la estación de muestreo (0 = campus UCR; 1 = Parque Nacional; 2 = Parques B° México y Cañas; 3 = Parques Central, Braulio Carrillo y La Dolorosa) y el grado de contaminación. ⁽¹³⁾

En el caso del estudio realizado en la ciudad de San Luis (Argentina) es evidente una tendencia hacia el llamado “desierto de líquenes”. En el sector Centro de esta ciudad, de 28 forófitos analizados, sólo uno evidenció la presencia de líquenes (3.57 %), lo que puede considerarse como extremadamente bajo. ⁽³⁾

En esta ciudad, el valor más bajo de IPA se evidenció en el sector Sureste. Este, junto con el sector Centro, es además el de menor riqueza de especies. Los valores bajos de riqueza e IPA en el sector Centro podrían asociarse a la contaminación, causada principalmente por el tráfico de vehículos. Los valores bajos del sector Sureste podrían asociarse a su proximidad a las zonas industriales. ⁽³⁾

Sin embargo, en el estudio llevado a cabo por Estrabou en 1998 en la ciudad de Córdoba (Argentina) se observó que algunas especies de líquenes se desarrollaban mejor en medios urbanos donde los niveles de contaminación eran altos en contraste con su desarrollo en áreas rurales. ⁽¹⁴⁾

Índice de Pureza Atmosférica (IPA)

Muchos estudios y programas nacionales de monitorización de líquenes incluyen una medida de diversidad de especies tales como el índice de pureza, índice de poleo-tolerancia o el índice de abundancia del líquen. ⁽¹⁵⁾

Esto se debe a que si bien la información cualitativa se puede recopilar simplemente enumerando la presencia o ausencia de especies, para obtener información cuantitativa es necesario el cálculo de alguno de estos índices. ⁽⁷⁾

El Índice de Pureza Atmosférica (IPA) se basa en la sumatoria de la frecuencia de aparición de especies de líquenes dentro de una red de muestreo. ^(3, 7, 16)

Calatayud-Lorente y Sanz (2000) aclaran que para utilizar escalas basadas en el cálculo del IPA, es necesario que se adapten para cada territorio, ya que la sensibilidad de las distintas

especies puede ser diferente. Según estos autores, esta sensibilidad viene relacionada también con factores climáticos (los líquenes en estado seco son menos sensibles al SO₂) o corológicos (una especie en el extremo de su área de distribución puede ser más sensible que en una zona donde esté en su óptimo ambiente).⁽¹⁷⁾

Los valores bajos de IPA identificarán áreas con baja diversidad de especies, mientras que los valores altos de IPA indicarán áreas con alta diversidad de especies. El método IPA tiene la potencial de proporcionar una medida cuantitativa del diferencial entre las comunidades urbanas y rurales del liquen. Aunque los valores de IPA son a menudo interpretados como indicadores de la contaminación del aire, las diferencias en IPA o riqueza de especies de liquen también pueden surgir debido a la perturbación del hábitat. En consecuencia, a veces se combina con otros índices tales como un índice de impacto humano para proporcionar una evaluación más general de la biodiversidad o el estrés ambiental.⁽¹⁵⁾

Dióxido de azufre

La naturaleza tóxica del dióxido de azufre es probablemente el principal factor que afecta a las especies de líquenes y a la corteza de los árboles, produciendo su acidificación⁽³⁾. Muchos estudios muestran una correlación positiva entre el contenido de azufre en líquenes y el SO₂ presente en la atmósfera.⁽¹⁾

Los estudios de campo donde se midieron las concentraciones de contaminantes ambientales muestran que las especies sensibles están dañadas o muertas por niveles anuales de dióxido de azufre tan bajos como 8-30 µg / m³ (0.003-0.012 ppm) y muy pocos líquenes pueden tolerar niveles superiores a 125 µg / m³.^(3, 6)

Los líquenes absorben el dióxido de azufre, del que retienen aproximadamente el 30 %. Al haber repetidas exposiciones al dióxido de azufre, el liquen acumula altos niveles de sulfatos y bisulfatos.⁽³⁾ Las primeras indicaciones de daño por contaminación del aire causado por SO₂ son la inhibición de la fijación de nitrógeno, el aumento de la pérdida de electrolitos y la disminución de la fotosíntesis y la respiración seguida de decoloración y muerte de las algas.^(3,6)

En el estudio llevado a cabo por Bargagli en Italia en 2001 se observó una fuerte reducción de la biodiversidad de líquenes debido presumiblemente a la emisión de H₂S por las centrales

eléctricas geotérmicas. En el área de estudio sólo se encontraron dos especies de líquenes *Physcia adscendens* y *P. biziana*, las cuales toleran concentraciones elevadas de SO₂.⁽⁹⁾

El SO₂ emitido en combinación con HF de una mezcla de industrias en el condado de Whatcom, Washington, se asoció con una grave disminución de la flora liquénica, a pesar de que los niveles de emisión estaban dentro de límites aceptables basados en las normas de salud humana establecidas por la US Environmental Protection Agency.⁽⁶⁾

En los estudios realizados en Inglaterra y Gales, se realizaron mapas de 11 zonas y se encontró correlación entre la diversidad de líquenes y los niveles de dióxido de azufre, pero no con los niveles de humo.⁽¹⁸⁾

Compuestos de nitrógeno

Los líquenes se ven afectados negativamente por la exposición a corto plazo a concentraciones de óxidos de nitrógeno tan bajas como 564 µg / m³ ^(3,6). Los efectos fisiológicos sobre el líquen al exponerlo a óxidos de nitrógeno son similares a los de exposición a dióxidos de azufre.⁽³⁾

Un aumento de especies nitrófilas se vincula con un aumento de óxidos de nitrógeno en áreas urbanas ^(3,15). Esto sugiere que el tipo, así como el número de especies de líquenes en un área, a veces se puede utilizar para caracterizar los cambios en la calidad del aire.⁽¹⁵⁾

Varios estudios realizados en el centro y el norte de Europa reconocieron la contaminación atmosférica del NH₃ como un factor importante que afecta a la vegetación epidémica del líquen. En los Países Bajos, durante los últimos 10 años, se ha producido un aumento de las especies de líquenes nitrófilas, paralelamente a una disminución de las acidófilas, en las zonas con alta densidad de ganado. Un cambio similar en la composición de especies también se observó en el Reino Unido y Suiza.⁽¹⁹⁾

En el estudio llevado a cabo por Frati L. & Santoni S en el 2007 en las inmediaciones de una granja porcina se encontró un total de 27 especies de líquenes epífitas; 16 especies fueron nitrófilas (destacaron: *Physcia adscendens*, *Hyperphyscia adglutinata* y *Phaeophyscia hirsuta*) y 3 estrictamente nitrófilas (destacaron: *Phaeophyscia orbicularis* y *Physconia grisea*).⁽¹⁹⁾

En este caso, la contaminación por NH_3 no causa un cambio en la composición de especies de líquenes que crecen en el roble de las especies acidófilas a las nitrófilas, sino de las especies neutrófilas-nitrófilas a las estrictamente nitrófilas. ⁽¹⁹⁾

Cabe destacar que entre los líquenes estrictamente nitrófilos encontrados, *Physconia grisea* fue la mejor especie indicadora para la contaminación de NH_3 . De hecho, la frecuencia de esta especie se correlacionó positivamente con las concentraciones de NH_3 y el pH de la corteza y negativamente con la distancia a la granja de ganado porcino. ⁽¹⁹⁾

Se concluyó que el efecto del NH_3 en los líquenes nitrófilos viene probablemente determinado por un aumento en el pH de la corteza en lugar de por un aumento de la disponibilidad de NH_4^+ . Esto es debido a que la contaminación del polvo alcalino eleva el pH de la corteza y provoca la hipertrofia de la misma. ⁽¹⁹⁾ Dieciséis especies de líquenes se correlacionaron con el pH de la corteza, 13 negativamente y 3 positivamente, lo que confirma la importancia de este factor. ⁽²⁰⁾

En los Países Bajos, una serie de estudios han demostrado que los fertilizantes a base de amoníaco alcalinizan y enriquecen los sustratos de líquenes que a su vez influyen fuertemente en la composición de la comunidad líquénica y en el contenido de los elementos. ⁽⁶⁾

El elevado número de especies (15 líquenes) que se ha correlacionado negativamente con las concentraciones de óxidos de nitrógeno (NO , NO_2 o NO_x) sugiere una influencia negativa del transporte sobre la calidad del aire de las ciudades. Además, en las zonas del centro de las ciudades donde la concentración de óxidos de nitrógeno es mayor, también se produce una disminución en el número y frecuencia de especies nitrófilas. ⁽²⁰⁾

Metales

Las actividades humanas están modificando el ciclo biogeoquímico de los metales pesados dando lugar a un aumento de sus formas químicas biodisponibles en ecosistemas terrestres y acuáticos. Esto hace que elementos como el rutenio, el paladio o el rodio entren cada vez más en nuestro medio ambiente. ^(5,9,15)

Los líquenes son ampliamente utilizados para estudiar la deposición atmosférica de elementos traza y metales pesados, debido a la relación directa entre la concentración de estos

compuestos en el talo del liquen y en el medio ambiente. Estos estudios nos permiten revelar diferentes niveles de acumulación de ciertos elementos, proporcionando así pistas sobre las fuentes de contaminación. (2, 5,7)

En relación con su toxicidad en los líquenes los metales pueden clasificarse en tres grupos: (6)

1. Los metales de la Clase A: K^+ , Ca^{2+} y Sr^{2+} se caracterizan por una fuerte preferencia por los sitios de unión que contienen O_2 y no son tóxicos. (6)
2. Los iones de metales de la clase B: Ag^+ , Hg^+ , Cu^+ tienden a unirse con las moléculas que contienen N y S, y son extremadamente tóxicos para los líquenes incluso a niveles bajos. (6)
3. Los metales limítrofes: Zn^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} son intermedios de los metales de las clases A y B. Los metales limítrofes, especialmente aquellos con propiedades de clase B (por ejemplo, Pb^{2+} , Cu^{2+}), pueden ser tanto perjudiciales por sí mismos como en combinación con dióxido de azufre. Esto proporciona una buena razón para monitorizar simultáneamente tanto contaminantes que contienen metales como azufre / nitrógeno si es posible. (6)

La toxicidad del metal en los líquenes se evidencia por los efectos adversos sobre la integridad de la membrana celular, el contenido e integridad de la clorofila, la fotosíntesis y la respiración, el rendimiento cuántico potencial del fotosistema II, la producción de estrés-etileno, la ultraestructura, las respuestas de reflectancia espectral, la resistencia a la sequía y la síntesis de diversas enzimas, metabolitos secundarios y moléculas de transferencia de energía. (6)

Un trabajo realizado en la isla Plumier, en el río Potomac, bajo la autopista Washington en Estados Unidos puso de manifiesto un aumento de los niveles de plomo en *Xanthoparmelia baltimoriensis* a partir de la construcción de la autopista. Sin embargo, cuando se reguló legalmente el uso del combustible sin plomo los niveles disminuyeron hasta los que tenían en 1930. (21)

En este aspecto *Evernia prunastri* ha sido considerada como un buen bioacumulador. En el estudio llevado a cabo por Rhzaoui G. & Divakar en Marruecos en 2015 se observó una alta concentración de Fe, Cr y Cu en las zona de Sidi Yahya y Mohammedia. En estas zonas

abundan las industrias del papel, del refinado así como el tráfico de vehículos, lo que explicaría la contaminación. ⁽⁷⁾

También en estas zonas se encontró una alta concentración de Zn, posiblemente debido al carbón, al uso de combustible o al desgaste de los neumáticos de los vehículos. ⁽⁷⁾

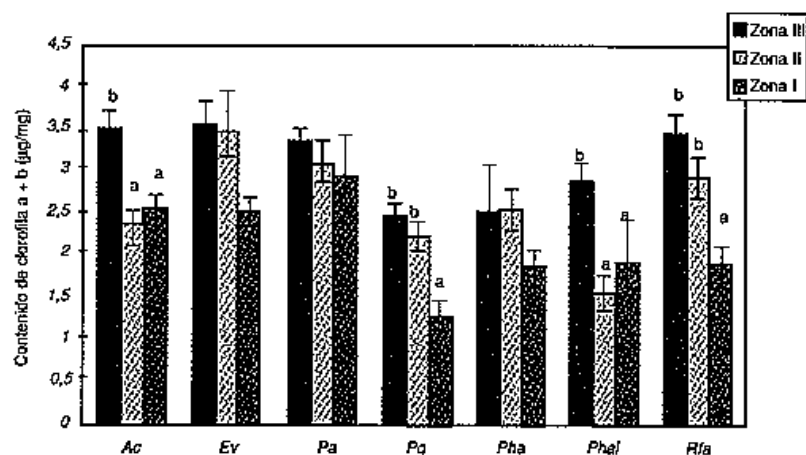
En el caso del plomo, componente tóxico liberado como consecuencia de diversos procesos industriales y del tráfico de vehículos, también ha sido detectado en *E. prunastri* en zonas industrializadas de Marruecos, Lituania e Italia ^(1,7)

En el estudio llevado a cabo por Loppi S. en 2000 se observa una elevada concentración de Cadmio en Bagni y S. Filippo. Los automóviles pueden ser la causa de los elevados niveles de Cd al tratarse de zonas turísticas y por tanto con tráfico abundante ⁽⁸⁾

Clorofilas

La concentración de clorofila a y b en líquenes se ve alterada como consecuencia de la contaminación producida por el tráfico de vehículos y las emisiones urbanas. En general, aquellos líquenes que son llevados a zonas con un intenso tráfico de vehículos muestran un incremento en la concentración de clorofila a y b que es proporcional al incremento de las emisiones de contaminantes. Estos efectos son producidos fundamentalmente por el azufre y los óxidos de nitrógeno ⁽¹⁾.

Estos datos se corroboran con los obtenidos por Calvo E. & Sanz M.J en el estudio llevado a cabo en el año 2000 en Font Roja (Alicante, España) ⁽³⁾



la figura 1 (zona I: área de baja calidad del aire; zona II: área de calidad intermedia; zona III: área de alta calidad del aire). (12)

El tráfico aéreo, y en particular los efectos del queroseno y del benceno, parecen tener un menor efecto sobre la población de líquenes que el tráfico terrestre (12). Esto, se demostró en el estudio realizado en el aeropuerto de Hamburg en 1994. (23)

Ozono

Los líquenes se ven afectados por concentraciones de ozono tan bajas como 20-60 $\mu\text{g} / \text{m}^3$. En general los líquenes secos se consideran menos susceptibles al daño del ozono. (6)

Sin embargo Scheidegger y Schroete afirman en el estudio llevado a cabo en 1995 que no se encontró relación entre los niveles de ozono y la distribución de líquenes, aunque las concentraciones de ozono en Londres exceden los niveles que se sabe causan daño físico a algunos líquenes. (22)

Mapas

La cartografía de la diversidad de especies de líquenes se utiliza ampliamente como una herramienta para medir el efecto biológico de la contaminación del aire e investigar el vínculo entre la calidad ambiental y la salud humana. (7, 15)

Un ejemplo es el estudio llevado a cabo por Cislighi & Nimis en 1997 que relaciona la biodiversidad liquénica con la calidad del aire y el cáncer de pulmón (16).

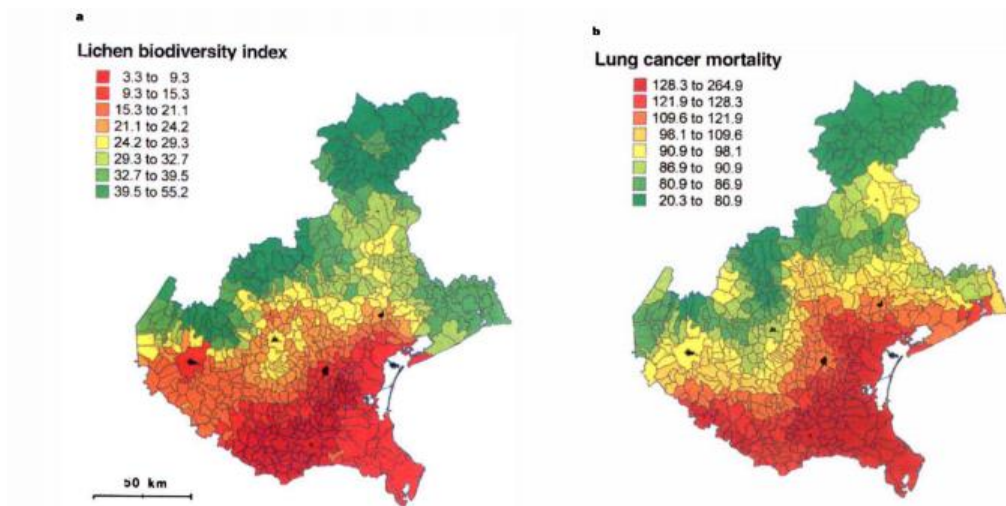
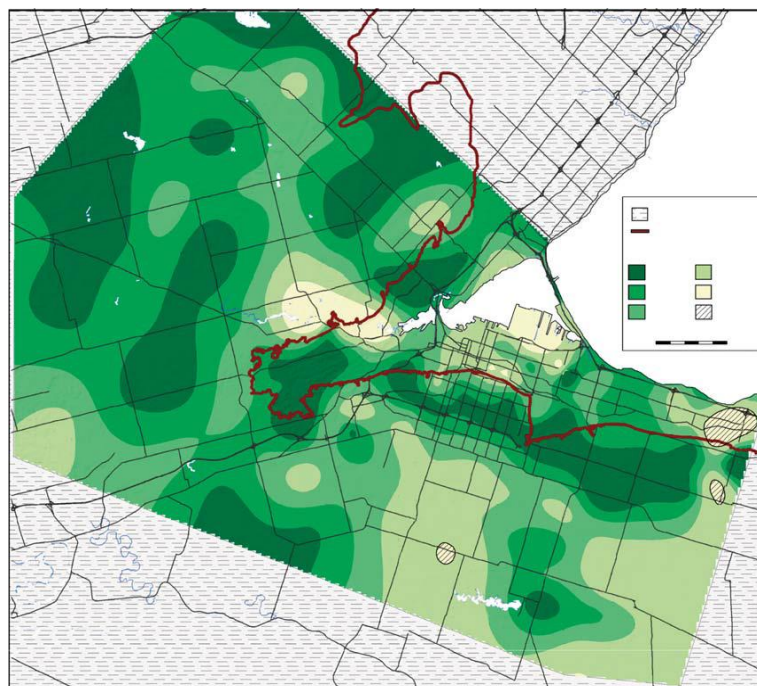


Figure 1 a, Lichen biodiversity, calculated as the sum of frequencies of all epiphytic species in a sampling grid of 10 units; and b, lung cancer mortality in young male residents (expressed as observed/expected cases $\times 100$), in the region of Veneto. Scale intervals are based on percentiles of values distribution.

El mapeo de los líquenes es especialmente útil en áreas urbanas, donde puede ser difícil y costoso monitorear una mezcla variada de contaminantes y fuentes puntuales utilizando detectores químicos-físicos ^(3,15). Los líquenes son, por tanto, útiles para determinar la distribución espacial de contaminantes en un área metropolitana. ⁽⁴⁾

El siguiente mapa IPA muestra que los desiertos de líquenes se superponen a partes del centro y áreas donde la industria pesada es el principal usuario de la tierra. ⁽¹⁵⁾



La principal ventaja del mapeo del líquen es su rentabilidad y su capacidad para proporcionar una medida rápida y útil de la alteración y la elasticidad del ecosistema. Esto ha sido bien

demostrado en Europa, donde los programas de monitoreo de líquenes han revelado la colonización de los árboles después de la aplicación de la legislación de aire limpio en Londres, París, Munich y Turín. ^(3, 15)

El declive de la flora epífita de Londres debido a la industrialización y su posterior mejoría es uno de los mejores ejemplos de cambio ambiental en respuesta a la legislación y factores socioeconómicos en cualquier ciudad del mundo. ⁽²⁰⁾

Desde que en 1983 dejó de funcionar una central térmica contaminante en el interior de la ciudad, especies que antes se encontraban refugiadas en la periferia del gran núcleo urbano, han migrado de nuevo al centro de Londres, incluyendo algunas especies que no se habían visto en el área desde hacía más de 200 años. ⁽²⁾

Limitaciones

Sin embargo, hay que tener en cuenta, que las especies utilizadas en la biomonitorización están sujetas a variaciones dependiendo de las condiciones ambientales, lo que puede modificar la tasa de crecimiento, la forma, la acumulación y/o la movilización de los contaminantes. ⁽⁹⁾

Un factor a tener en cuenta es que la respuesta de cada organismo está fuertemente influenciada por las condiciones físicas de la atmósfera (temperatura, humedad, vientos y radiación), así como por las condiciones fisiológicas y nutricionales. ⁽³⁾ Las comunidades de líquenes varían con la ecorregión. Cuanto mayor sea el rango climático y de elevación dentro del área de estudio, más difícil será separar las influencias ambientales de las influencias de la contaminación en el líquen. ⁽⁶⁾

La respuesta de las comunidades de líquenes (por ejemplo, crecimiento o disminución) se basará en la mezcla total de contaminantes acidificantes, fertilizantes y oxidantes, a veces dificultando la determinación de la concentración del elemento de impacto en el tejido en la condición o viabilidad del líquen. ⁽⁶⁾

Algunos metales no son lixiviados fácilmente del talo del líquen y pueden permanecer concentrados por más de 10 años, haciendo difícil evaluar cuando el contaminante fue acumulado. Para superar este problema, se pueden usar trasplantes, se pueden seleccionar

especies diana que tienen marcadores de crecimiento anuales visibles), o se pueden recoger material de sustratos de edad conocida (tal como en los últimos 3 -5 cicatrices terminales del brote en árboles del anfitrión).⁽⁶⁾

Los líquenes pueden ser difíciles de encontrar donde la lluvia ácida, el SO₂ o la deposición de nitrógeno son un problema. En estos casos también puede ser necesario el uso de trasplantes o la elección de especies con tolerancia relativa a estos contaminantes.⁽⁶⁾

Aunque los estudios han demostrado que muchas especies de líquen responden negativamente a las concentraciones altas de dióxido de azufre (SO₂), los efectos directos del ozono (O₃) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) en las comunidades de líquen no se conocen bien.⁽¹⁵⁾

Es importante comprender que los líquenes nunca podrán reemplazar totalmente a los equipos técnicos que miden contaminación ambiental.⁽²⁾

CONCLUSIONES

1. Los líquenes son, actualmente, herramientas esenciales como bioindicadores de la calidad del aire. Son más rápidos y menos costosos que otras técnicas siendo por esto, además, útiles como señales de alarma de contaminación atmosférica
2. Los mapas que muestran la biodiversidad de líquenes son muy utilizados en estudios medioambientales.
3. El índice de pureza del aire (IPA) muestra que las áreas residenciales tienen más biodiversidad de líquenes y, por lo tanto, un aire más limpio que el centro de las ciudades y las zonas más industrializadas
4. La ausencia casi total de líquenes puede relacionarse con la baja calidad del aire como consecuencia de la circulación de vehículos a motor, la presencia de calles angostas, la falta de áreas verdes urbanas y la conformación de espacios con poca renovación del aire

BIBLIOGRAFÍA

1. Conti, M.E. & Cecchetti, G. (2001) Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment a review — Environ. Pollut. 114 (3): 471-92.
2. Hawksworth D.L., Iturriaga T. y Ana Crespo A. (2005). Líquenes bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. Rev Iberoam Micol, 22: 71-82
3. Lijteroff R., Lima L. & Prieri B. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. Rev. Int. Contam. Ambient. 25 (2) 111-12.
4. Fuga A., Saiki M., Marcelli M.P, Saldiva P.N.H. (2008). Atmospheric pollutants monitoring by analysis of epiphytic lichens. Environmental Pollution, 151 334-340
5. Liu, H.-J. *et al.* (2016). Use of the lichen *Xanthoria mandschurica* in monitoring atmospheric elemental deposition in the Taihang Mountains, Hebei, China. Sci. Rep. **6**, 23456; doi: 10.1038/srep23456
6. Blett T., Geiser L. & Porter E. (2003) Air Pollution-Related Lichen Monitoring in National Parks, Forests, and Refuges: Guidelines for Studies Intended for Regulatory and Management Purposes. Nature
7. Rhzaoui G.E, Divakar P.K, Crespo A. & Tahiri H. (2015). Biomonitoring of air pollutants by using lichens (*Evernia prunastri*) in areas between Kenitra and Mohammedia cities in Morocco. Lazaroa. 36: 21-30.
8. Loppi S., Bonini I. (2000) Lichens and mosses as biomonitors of trace elements in areas with thermal springs and fumarole activity (Mt. Amiata, central Italy). Chemosphere 41 1333-1336
9. Bargagli, R., Monaci, F., Borghini, F., Bravi, F., & Agnorelli, C. (2002). Mosses and lichens as biomonitors of trace metals. A comparison study on *Hypnum cupressiforme* and *Parmelia caperata* in a former mining district in Italy. Environmental pollution, 116(2), 279-287

10. Cislaghi. C, Nimis P.L. (1997). Lichens, air pollution and lung cancer. *Nature*; 387 (mayo) 463-464
11. Sigal, L. L. (1988) The relationship of lichen and bryophyte research to regulatory decisions in the United States. In *Lichens, Bryophytes and Air Quality*. (T. H. Nash III & V. Wirth, eds.): 269-287. Berlin-Stuttgart: Cramer.
12. Calvo E. & Sanz M.J. (2000). Líquenes como bioindicadores de la calidad ambiental en el parque natural de la Font Roja (Alicante, España). *Ecología*, nº 14, pp. 103-115
13. Sáenz, A. E., Flores, F., Madrigal, L., & Di Stefano, J. F. (2007). Estimación del grado de contaminación del aire por medio de la cobertura de líquenes sobre troncos de árboles en la ciudad de San José, Costa Rica. *Brenesia*, 68(68), 29-35.
14. Estrabou C. (1998) Lichen species identification and distribution according tolerance to airborne contamination in the city of Córdoba (Argentina). In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB: 65-169.
15. McCarthy, D.P., Craig, B. & Brand, U. (2009) Lichen monitoring of urban air quality, Hamilton, Ontario — In: Lange, A.H. (Ed.). *Air Quality and Ecological Impacts: Relating Sources to Effect*. Pp. 247-267. *Develop. Environ. Sci. Vol. 9*. Elsevier Ltd., Amsterdam
16. Nimis. P.L., Castello M. and Perotti M. (1990). Lichens as biomonitors of sulphur dioxide pollution in la Spezia (Northern Italy). *Lichenologist*, 22(3): 333-344
17. Calatayud-Lorente V. y Sanz Sánchez M. (2000). *Guía de Líquenes Epífitos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, 185 pp.
18. Hawksworth DL, Rose F. (1976) Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature*; 227: 145-148.
19. Frati L., Santoni S., Nicolardi V., Gaggi C., Brunialti G., Guttova A., Gaudino S., Pati A., Pirintzos S.A., Loppi S. (2007) Lichen biomonitoring of ammonia emission and nitrogen deposition around a pig stockfarm. *Environmental Pollution* 146 311-316

20. Larsen, R. S., Bell, J. N. B., James, P. W., Chimonides, P. J., Rumsey, F. J., Tremper, A., & Purvis, O. W. (2007). Lichen and bryophyte distribution on oak in London in relation to air pollution and bark acidity. *Environmental pollution*, 146(2), 332-340.
21. Lawrey JD. (1993) Lichens as monitors of pollutant elements at permanent sites in Maryland and Virginia. *Bryologist*; 96: 339-341.
22. Scheidegger, C., Schroeter, B., (1995). Effects of ozone fumigation on epiphytic macrolichens: Ultrastructure, CO₂ gas exchange and chlorophyll fluorescence. *Environmental Pollution* 88, 345.
23. Rothe H., Bigdon M., (1994). Incidence of lichens in the area of the Hamburg airport. *Gesundheitswesen* 56 (10), 563-566.