

**Observatorio Medioambiental**

ISSN: 1139-1987

<http://dx.doi.org/10.5209/OBMD.93022>EDICIONES  
COMPLUTENSE

## Bioindicadores en contextos metropolitanos del siglo XXI

Eduardo Sánchez de la Iglesia<sup>1</sup>

Recibido: 29 de enero del 2023 / Enviado a evaluar: 1 de febrero del 2023 / Aceptado: 4 de diciembre del 2023

**Resumen.** Este trabajo de investigación se centra en el análisis de bioindicadores como herramientas de control y seguimiento de la calidad ambiental en múltiples zonas a nivel internacional. Recorriendo sus orígenes, sus cualidades más representativas y ejemplos de resultados exitosos. Una vez tratada la temática de forma genérica, el artículo hace especial hincapié en uno de los bioindicadores con más potencial cuya utilización y estudio ha aumentado considerablemente durante las últimas décadas: los líquenes. Siendo conscientes de sus virtudes en relación con el análisis de la contaminación atmosférica, pero aludiendo a otro tipo de correlación futura que puede expandirse a través de los niveles de biodiversidad líquénica y otro tipo de variables de carácter socioeconómico.

**Palabras clave:** Sostenibilidad; bioindicadores; líquenes; contaminación atmosférica; educación ambiental; biodiversidad.

### [en] Bioindicators in metropolitan contexts of the 21st century

**Abstract.** This research work focuses on the analysis of bioindicators as tools for the control and monitoring of environmental quality in multiple areas at an international level. It reviews their origins, their most representative qualities and examples of successful results. Having dealt with the subject in a generic way, the article places special emphasis on one of the bioindicators with the greatest potential, whose use and study has increased considerably over the last few decades: lichens. Being aware of its virtues in relation to the analysis of atmospheric pollution, but alluding to another type of future correlation that can be expanded through the levels of lichen biodiversity and other types of socio-economic variables.

**Keywords:** Environment; sustainable tourism; taxation; Balearic Islands.

---

<sup>1</sup> Multiservicios Aeroportuarios, S.A.  
E-mail: [edu48sanchez@gmail.com](mailto:edu48sanchez@gmail.com)

## [fr] Bioindicadores dans les contextes métropolitains du 21<sup>e</sup> siècle

**Résumé.** Ce travail de recherche se concentre sur l'analyse des bioindicateurs en tant qu'outils de contrôle et de surveillance de la qualité de l'environnement dans de multiples domaines au niveau international. Il passe en revue leurs origines, leurs qualités les plus représentatives et des exemples de résultats probants. Après avoir traité le sujet de manière générique, l'article met l'accent sur l'un des bioindicateurs les plus prometteurs, dont l'utilisation et l'étude se sont considérablement développées au cours des dernières décennies: les lichens. Tout en étant conscient de ses vertus dans le cadre de l'analyse de la pollution atmosphérique, l'article fait allusion à un autre type de corrélation future qui peut être développée à travers les niveaux de biodiversité des lichens et d'autres types de variables socio-économiques.

**Mots-clés:** Durabilité; bioindicateurs; les lichens; pollution de l'air; éducation à l'environnement; biodiversité.

**Cómo citar.** Sánchez de la Iglesia, E. (2023). Bioindicadores en contextos metropolitanos del siglo XXI. *Observatorio Medioambiental*, 26, 103-131.

### Sumario.

1. Introducción. 2. Estereotipo natural como forma de entender el medio ambiente. 3. Bioindicadores: una búsqueda compleja. 4. De bioindicadores a indicadores de primera generación. 5. Líquenes como bioindicadores contemporáneos. 6. Concepción y utilidad de líquenes en relación con actividades antrópicas. 7. Consideración de los líquenes como bioindicadores ambientales. 8. Potencial líquénico como indicadores de segunda y tercera generación. 9. Tecnología como Sistema de vigilancia de la calidad del aire: el caso de la ciudad de Madrid. 10. Aplicación de líquenes en el desarrollo de estrategias educativas de índole ambiental. 11. Impacto, viabilidad, adecuación y transferencia de la aplicación líquénica como herramienta ligada a la educación ambiental. 12. Conclusiones. 13. Bibliografía.

## 1. Introducción

La transición conceptual en la importancia de la preservación del medio ambiente por parte de instituciones y de la sociedad general en las últimas décadas ha posibilitado que exista una reacción necesaria en cuanto al conocimiento e información que poseemos sobre el propio medio.

Precisamente el análisis paulatino de la dualidad entre el ser humano y el medio ambiente en su conjunto queda reflejado en la aparición de esta temática en diversas publicaciones de índole científico, así como en su nueva comprensión asociada a su influencia recíproca.

Unas preocupaciones de carácter ambiental que surgen de la consideración de una situación actual en materia de sostenibilidad alarmante. Lo que conlleva el desarrollo e interacción entre diversas disciplinas para potenciar la búsqueda de alternativas y metodologías que aboguen por alcanzar acuerdos. Instando por mejorar los estándares de calidad de vida de la población y solucionar los problemas más acuciantes a los que se enfrenta la sociedad actual.

De hecho, la progresiva aparición y consolidación de estas materias en el contexto actual se constata como un compromiso adicional de la importancia que esta temática ha ganado en los años anteriores. Un compromiso presente en el contexto administrativo y social mayoritario, fehaciente a través de la multitud de legislación

asociada a la biodiversidad. Todo ello consolidado a través de investigaciones científicas que tratan de avanzar en el conocimiento existente sobre el medio natural y la variedad de iniciativas sociales enfocadas hacia un comportamiento adecuado con el medio ambiente.

Todas estas circunstancias son claro ejemplo de la necesidad de una interacción multidisciplinar para conseguir dichos objetivos, donde cada materia trate su identidad propia pero además sea capaz de integrar un papel grupal dentro de las necesidades que alberga el ambiente en su conjunto.

En consecuencia, la interacción de estas disciplinas, tanto aquellas más clásicas como las de más reciente creación, sería un bien necesario para solucionar las diversas problemáticas que se presentan en el ámbito territorial y ambiental.

Sin embargo, la totalidad del marco teórico anterior configura un punto de partida interesante para plantear las problemáticas actuales y consolidar distintas formas de control que permitan realizar diagnósticos de actualidad. Además de plantear posibles soluciones desde un punto de vista integrador. Siendo también una circunstancia a tener en cuenta que dichas propuestas se encuentren en consonancia con la Agenda 2030 desarrollada por la Organización Mundial de las Naciones Unidas y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible que la componen. Un hecho que permite visibilizar las preocupaciones y las metas que como sociedad nos hemos marcado a corto y medio plazo para conseguir unos estándares elevados en materia sostenible pero también socioeconómica.

En todo ello, y para conseguir trasladar la parte teórica a la realidad territorial de cada lugar específico, es preciso contar con la investigación y aplicación de indicadores de índole ambiental, social y económico. De hecho, su correcta elección permite obtener información y datos de interés para poder contextualizar problemáticas de todo tipo, potenciar comparaciones históricas y en definitiva conocer el medio en el que nos hemos instaurado. Comprometiéndonos con ello a su no devaluación ni destrucción debido a actividades de carácter antrópico.

## **2. Estereotipo natural como forma de entender el medio ambiente**

Se puede definir el término estereotipo como una idea o imagen comúnmente aceptada por la sociedad con carácter inmutable. Una definición aplicada a multitud de ámbitos y que destaca precisamente por su inmutabilidad que literalmente alude a la imposibilidad de que esa imagen o idea sea cambiada.

Si aplicamos este concepto a nuestra percepción de la naturaleza, encontramos que los seres humanos poseemos diversos estereotipos. En algunas ocasiones desarrollados a partir de nuestra propia experiencia en el medio natural y otras veces derivados de nuestra inexperiencia o desconocimiento del mismo. Un hecho que ha provocado que, en ciertos momentos de la historia, hayamos infravalorado multitud de entornos naturales que no se ajustaban del todo a nuestras ideas preconcebidas de la naturaleza.

Corresponde con una circunstancia prácticamente inevitable que al discurrir acerca de la belleza de paisajes y entornos naturales, se nos venga a la cabeza la idea de naturaleza sin límites asociada con imágenes que posean un atractivo icónico. Que además actúe como hogar de un sinfín de especies animales y vegetales, ejerciendo además como refugios de paz para el ser humano en contraste de la siempre bulliciosa ciudad.

Sin embargo, esta idea de naturaleza es resultado del énfasis desarrollado por convicciones conservacionistas a la hora de valorar la indispensable necesidad de conexión humana con los enclaves naturales. Y es que precisamente este tipo de paisajes, acompañados con elementos de carácter abiótico y biótico de grandes dimensiones como cauces fluviales, cascadas o seres vivos ayudan a establecer un estereotipo de naturaleza ampliamente valorado por nosotros mismos cuantas menos señales de presencia antrópica sean apreciables.

En este punto cabe destacar el razonamiento presente en Ayestarán y García (2010) en el que se señala el cambio como motor indiscutible de la *physis* asumiendo que éste es el único elemento que siempre se encuentra presente en la dinámica de la naturaleza en su perpetua búsqueda del equilibrio. Siendo preciso valorar la influencia que posee este estereotipo en la naturaleza del cambio y si existe una distancia palpable entre las necesidades del ambiente y el proceder humano en relación con ellas.

Teniendo en cuenta que la concepción de este estereotipo siendo asumido e integrado en la conciencia y mentalidad de la población en su conjunto, también forma parte del desarrollo de indicadores de índole ambiental que han sido y serán siendo creados en las próximas décadas para poder aumentar nuestro conocimiento sobre la interrelación de nuestras propias actividades e influencias sobre el medio que nos rodea.

La tendencia contemporánea asociada a la magnitud de los acontecimientos extremos de índole climática que se suceden cada vez con una mayor frecuencia se encuentra en concordancia con el fomento del crecimiento ilimitado de la biodiversidad, sin tener en cuenta en muchos casos problemáticas que pueden desencadenarse en virtud de las especies endémicas del lugar o del medio físico autóctono que puede sufrir daños irreparables. Y es muy posible que este estereotipo sí que tenga una responsabilidad en este ámbito, en la búsqueda antrópica de una naturaleza esplendorosa y sin límites que es en muchos casos se entiende como sinónimo de salubridad y calidad de vida.

Razonadamente este hecho puede resultar a modo de símbolo para muchas zonas concretas incluso como producto o forma de vida, pero siempre con la suficiente coherencia para saber diferenciar aquellas circunstancias y diversificaciones que radican entre el concepto de naturaleza bien conservada, naturaleza esplendorosa y naturaleza autóctona. Tres diferenciaciones que en casos puntuales pueden considerarse de forma simultánea pero que en la mayoría de ellos deben distinguirse como matices relevantes a la hora de afrontar labores conservacionistas y de realidad ligada permanentemente a la percepción humana.

En este punto la educación ambiental vuelve a ganar una consideración fundamentada para la consecución de los grandes anhelos y objetivos del medio natural, debido a que en el momento actual en el que nos encontramos se constituye como una disciplina esencial para el presente y el futuro. Buscando un ideal de conservación y concienciación que no obligue a seleccionar o elegir en situaciones extremas que elementos preferimos preservar en detrimento de otros.

Pese a que no debemos olvidar que la búsqueda perpetua del equilibrio natural rige las influencias de cada uno de los actores que influyen en el medio ambiente y que nuestra propia interpretación sobre los designios naturales puede ejercer como factor limitante. No obstante, el equilibrio natural en algunos momentos contrasta con el equilibrio socioeconómico que en ocasiones impera. Por lo que la concienciación popular debe dirigirse hacia esa cuestión: la combinación entre ambos intereses y el fomento de un sentimiento de pertenencia al entorno.

### **3. Bioindicadores: una búsqueda compleja**

Derivada de la importancia de preservar y conseguir un análisis multidisciplinar del medio, se constituye la responsabilidad interpuesta a los indicadores ambientales aparece la necesidad de conseguir aplicar dichas funciones a una serie de organismos que puedan cumplir con las características otorgadas a cualquier tipo bioindicador. De hecho, esta labor de búsqueda es tan relevante como compleja debido a que no existen en la actualidad una cantidad ilimitada de bioindicadores ni tampoco todos ellos pueden ser aplicados a cualquier territorio (bien sea por ausencia de una concentración suficiente de éstos o por su disfunción localmente presentada).

Sin embargo, al argumento anterior hay que sumarle una dificultad añadida, representada en la falta de consenso científico a la hora de configurar una definición única y representativa de bioindicador. Y no solo ello, además del debate en su definición tampoco existe unanimidad en el momento de describir la totalidad de las cualidades propias que deben reunir para poder ser considerados como uno de ellos.

Por consiguiente, el empleo de bioindicadores ha sido objeto de mucha controversia en la comunidad científica desde hace décadas tanto por los aspectos tan positivos que aporta, pero también por la cantidad de inconvenientes que han sido citados por diversos autores.

Por una parte, el uso de bioindicadores proporciona una alternativa sostenible y de bajo presupuesto para la detección de problemáticas de carácter ambiental. Centrándose en la fiabilidad en el control de contaminantes y de sus efectos derivados en el medio ambiente bien sea a través de su propia influencia o a través de su interacción con otros.

Además, estos organismos pueden incluso alertar sobre impactos clave en los entornos naturales y metropolitanos como la sobreexplotación de los recursos, la introducción de especies alóctonas e invasoras o los efectos nocivos de la actividad turística.

En contraposición, su aplicación también suscita dudas y determinadas desventajas que distintos autores han optado por destacar en sus publicaciones y que deben ser planteadas a la hora de realizar un análisis completo de su puesta en marcha. Este es el caso de lo argumentado por Koskimies (1989) donde se critica que estos organismos solo pueden ejercer como tales en unas condiciones ecológicas muy concretas y estrictas, tipo hábitat.

Por otra parte, otras opiniones se decantan por el hecho de que existen multitud de factores que afectan a estos organismos directa o indirectamente y que no guardan una relación evidente con el deterioro de un ecosistema. Pudiendo llegar a concluir la dificultad un mismo método en lugares y épocas distintas.

Todo ello también forma parte de la concepción contemporánea de la utilidad de los bioindicadores por parte de la comunidad científica. Debiendo ser conscientes de que la disconformidad en la unanimidad de su empleo afecta claramente a la adopción de estos organismos por parte de las administraciones como metodología de referencia.

Y, por si fuera poco, tampoco existe claridad en su definición y terminología asociada existiendo una inmensa variabilidad en función de la disciplina científica concreta y momento temporal que lo conforme. De esta manera, podemos apreciar una gran cantidad de definiciones albergadas por distintos autores que han tratado históricamente de aportar claridad sobre la raíz y el potencial presente y futuro del uso de bioindicadores en términos ambientales.

Ejemplo de lo anterior se pueden considerar definiciones genéricas de bioindicador como aquel organismo que contine información sobre la calidad de un entorno natural. En sintonía con esta idea aparece otra definición aportada por Hawksworth et al. (2005) que reflejaba lo anterior como organismos que manifiestan síntomas significativos en respuesta a los cambios ambientales.

Matices al margen como en el caso de los ejemplos expresados en el párrafo anterior, podemos destacar una idea adicional representada por Nimis et al. (1991) que definen el término como organismos que presentan reacciones perceptibles en relación a distintos niveles de contaminación.

En todas las anteriores se aprecia una similitud conceptual relevante, aunque cada una individualmente posee aspectos discordantes. Sin embargo, llama la atención que todas ellas enfoquen su concepción únicamente hacia aspectos ambientales del medio, ya sea en entornos urbanos o más alejados de éstos, sin ni siquiera plantear la posibilidad de que puedan identificar además aspectos socioeconómicos y de otra índole asociados a los asentamientos urbanos más próximos a ellos.

No planteando o al menos no analizando todo el potencial ligado a la información que pueden llegar a aportar los bioindicadores en su aplicación principalmente en núcleos metropolitanos que puede trascender más allá del ámbito puramente ambiental.

Sin embargo, y en complemento a la definición de bioindicador, es preciso conocer también otros dos conceptos muy ligados al anterior y que suelen generar controversia en cuanto a la diferenciación existente con el término de bioindicador como son los de biomonitores y bioacumuladores.

Si bien es cierto que en muchas ocasiones estos términos se utilizan indistintamente para mencionar a determinados organismos, la realidad es que sus significados tienen diferencias muy relevantes. Más allá de que en algunas ocasiones haya organismos que poseen características intrínsecas que les permitan actuar simultáneamente de acuerdo a las definiciones planteadas para estos conceptos. Tan importante es su conexión entre todas ellas como se deriva del argumento aportado por Nimis et al. (1991) afirmando que un bioindicador solo es apropiado cuando puede ser utilizado a su vez como biomonitor. Un pensamiento que enfatiza esta relación y que condiciona la actividad óptima de los bioindicadores para poder aportar información válida.

En primer término, se puede entender un bioindicador como una especie animal o vegetal capaz de acumular sustancias contaminantes en el interior de sus órganos y tejidos. A pesar de que también debe ser tenida en cuenta la definición publicada por Hawksworth et al. (2005) donde los biomonitores se establecen como organismos o poblaciones estudiadas y comparadas a lo largo del tiempo tomando en cuenta las desviaciones del comportamiento esperado. Apelando esta última por el matiz de la investigación prologada en múltiples espacios para la creación de un histórico que permita comparar contextos similares y prever situaciones futuras.

Asumiendo que esta peculiaridad precisamente puede ejercer como una diferencia adicional a la hora de distinguir a bioindicadores de biomonitores, puesto que, en su definición de bioindicadores Hawksworth et al. (2005) no mencionan la posibilidad de poder llevar a cabo comparaciones poblacionales derivadas de su investigación.

Sin embargo, la polémica entre estos tres términos propicia la necesidad de definir claramente qué es un bioacumulador y cuál es su distinción principal de los dos anteriores. Pese a que esa circunstancia, como ocurre en los casos anteriores, también depende de la disciplina y experiencia de cada uno de los autores.

En este sentido, existen además varias corrientes que más allá de la interpretación individual de término se encuentran divididos en la manera de clasificar estos organismos. Por una parte, autores como Capó (2007) asumen que los acumuladores son un tipo de bioindicadores incluyéndolos en su categorización en función de su reacción frente a perturbaciones de carácter ambiental.

En la posición totalmente contrapuesta, aparecen otras publicaciones que abogan por establecer un concepto propio para esta característica dando lugar a la concepción de bioacumuladores. Definidos por Conti y Cecchetti (2001) como organismos cuya concentración de contaminantes establecidos en su interior puede ser correlacionada con su concentración en el entorno colindante.

En consideración con lo anterior, podemos extraer que los bioacumuladores ofrecen información de carácter cuantitativo a través de valores numéricos derivados del análisis de las respectivas concentraciones de contaminantes. De la misma manera que aportan información cualitativa asociada a la simple presencia de contaminantes en el interior de estos organismos.

Aunque si comparamos las definiciones propuestas para los organismos acumuladores como un tipo de bioindicadores y las relacionadas con los organismos

que actúan como bioacumuladores podemos apreciar algunas diferencias que no deben pasar desapercibidas.

Capó (2007) habla de bioindicadores de tipo acumulador para aquellos organismos que pueden albergar ciertas sustancias en su interior. Sin embargo, Conti y Cicchetti (2001) disponen que los bioacumuladores deben ofrecer una correlación entre la concentración de contaminantes y el entorno próximo.

Por todo ello, se podría considerar a los bioacumuladores como aquellos organismos que llevan a cabo alguno de los procesos de bioconcentración captando sustancias o componentes del entorno próximo. De estos, se pueden obtener las concentraciones de cada una de esas sustancias a raíz de métodos de carácter científico y que pueden ser correlacionadas con las concentraciones presentes en el entorno colindante.

Mientras que los bioindicadores de tipo acumulador serían los organismos que absorben sustancias del entorno que los rodea presentando una gran resistencia a las mismas, pero de las que no se podrían obtener valores de concentración de carácter cuantitativo. Siendo esta la principal diferencia a la hora de disgregar el papel de cada uno en su consideración ambiental.

#### **4. De bioindicadores a indicadores de primera generación**

La búsqueda potencial de indicadores multidisciplinares para la obtención de información asociada al contexto socioeconómico y por consiguiente ambiental, ha sido una constante en las últimas décadas.

Con esta necesidad y con la idea de generar un marco teórico la OCDE planteó a finales del siglo XX, impulsó el desarrollo de cuatro de los principales modelos reafirmados internacionalmente durante el último medio siglo, comprobando así si el uso de bioindicadores entre otros tipos de indicadores puede estandarizarse en diversos contextos donde también está presente el metropolitano desde esta visión.

Aunque hay que tener presente que todos ellos poseen en común la característica de que se encargan como asignatura principal del estado del medio ambiente desde todas sus perspectivas, pero desde un enfoque teórico. Aunque su desarrollo y aplicación podrían contribuir de forma relevante según se discurre en Sotelo y al. (2011) a la implicación institucional en el uso, seguimiento y control de los instrumentos puestos en marcha con anterioridad.

Ciertamente la totalidad de los modelos de primera generación que se exponen durante este artículo se asemejan en la utilización de una serie de variables identificadas bajo distintas denominaciones que se ordenan de manera concreta para centrarse en aspectos específicos pertenecientes al medio ambiente.

Con este planteamiento se establecen las distintas variables que configuran los cuatro modelos y que se ubican bajo la siguiente denominación: fuerza motriz, presión, estado, impacto y respuesta.

De hecho, los cuatro modelos en los que pone el foco esta investigación han sido confeccionados cronológicamente en virtud de las necesidades y las problemáticas

que se fueron identificando en virtud de la aplicación de los estándares teóricos a la siempre confusa e imprevisible realidad. Por esta razón, se ha producido históricamente una transformación de los modelos originales que ha propiciado su recorrido hacia la complejidad actual aunando multitud de variables que se han establecido como imprescindibles a la hora de analizar la información que aporta el medio contemporáneo.

Por ende, la conceptualización de estos como parámetros relevantes para ilustrar la dimensión moderna del ambiente propiciando con ello metas dimensionales y factibles. Efectuando y dando la posibilidad de permitir de la misma forma el estudio en su conjunto de las herramientas preestablecidas para impulsar una mejora en el contexto ambiental contemporáneo.

A raíz de ello se realiza una pequeña incursión en los cuatro modelos más recocidos para la confección de indicadores de primera generación: Presión-Estado-Respuesta (PER), Fuerza Motriz-Estado-Respuesta (FER), Fuerza Motriz-Presión-Estado-Respuesta (FPER) y Fuerza Motriz-Presión-Estado-Impacto-Respuesta (FPEIR). Puntualizando además en la idea de que a pesar de que se tanto el modelo FPER como FPEIR surgen como una evolución de los primeros, todos ellos permanecen vigentes y pudiendo llegar a ser contemplados desde una perspectiva complementaria. Siendo por tanto imprescindible realizar un análisis previo de la situación del medio donde se pretende utilizar alguno de ellos para poder seleccionar apropiadamente el que mejor se adapte.

- PER

El primero de ellos surge de la necesidad de encontrar un método que proponga la corroboración de manera fiable de las transformaciones de carácter socioeconómico que experimenta un determinado espacio a lo largo de un periodo de tiempo prolongado. Por consiguiente, la importancia de contar con un prototipo funcional para analizar los cambios y sus factores asociados, llevaron a la OCDE a desarrollar éste en el año 1993 relacionándolo estrechamente con el concepto de causalidad.

Intrínsecamente en su propio concepto y consideración del modelo PER, se configura un marco de referencia basado en primer lugar en las presiones que ejercen los hábitos y comportamientos humanos en el medio ambiente adyacente. Produciendo en consecuencia una alteración de las condiciones naturales del mismo y por tanto en el estado en el que se encuentra tras los cambios ocasionados.

Prosiguiendo con la sucesión cronológica y absolutamente causal, se consigue obtener una respuesta de la sociedad frente a la nueva situación. Lo que provoca con cierta frecuencia el desarrollo de nuevas políticas ambientales asociadas a las preocupaciones contemporáneas de la sociedad, cambios en los usos del suelo o incluso la modificación en la forma de consumir por parte de los visitantes a los espacios naturales.

- FER

Siguiendo con el desarrollo del modelo primigenio es preciso ir un paso más allá para comentar otro modelo implando por la OCDE en el que surge una variación principal que consiste esencialmente en la sustitución del concepto de presión como elemento principal por el de fuerza motriz. Siendo ésta el componente principal desencadenante de la respuesta final, intercambiándolo por la variable presión que conforma en elemento primigenio en el modelo PER.

Este término novedoso, que añade al sistema nuevas características y posibilidades, pudiendo ser comprendidos como indicadores representativos de las actividades humanas, procesos de consumo o producción que impactan en los objetivos de desarrollo sostenible como representantes de la actualidad sostenible planetaria.

La singularidad con más relevancia integrada en él reside en la concepción de las variables y aspectos alejados de los componentes ambientales de la sostenibilidad, enfocándose en que las fuerzas motrices actúan como influencias representativas en el momento de propiciar variaciones con connotaciones positivas como negativas en el resto de elementos del sistema.

De la manera que señalan Velázquez y Salazar (2019), el modelo FER es diferencial con respecto al PER al facilitar la incorporación del componente social al devenir del desarrollo sostenible, redefiniendo la consideración de la interacción de las actividades antrópicas contemporáneas y el medio ambiente urbano ligadas a las necesidades de las grandes ciudades.

Añadiendo a lo anterior que el modelo FER se responsabiliza del estudio de variables económicas que guardan relación con las cuestiones sociales previamente especificadas y que en consecuencia afectan a los demás componentes de la ecuación incorporados en este modelo. Los niveles de vida y de consumo influyen además de forma relevante en el ambiente urbano, generando asociaciones entre algunas actividades económicas que pueden ser capaces de desencadenar transformaciones de carácter demográfico.

Sin embargo, el uso de fuerzas motrices en este esquema requiere de una gran precisión en la forma singular de desencadenar el conjunto. Puesto que su interpretación puede tener repercusiones positivas o negativas de índole socioeconómica, pero posee un efecto contrario en el aspecto ambiental.

Por lo que su aplicación a la realidad de los contextos tanto metropolitanos como de otras características no es una labor simple debido a que en consideración con lo especificado por Polanco (2006) es un modelo que presenta limitaciones similares a las que puede presentar el PER, aunque con la dificultad adicional de agregar a la cuestión ambiental y las dimensiones social y económica.

- FPER

Como consecuencia de las problemáticas asociadas a los dos modelos anteriormente definidos, aparece una actualización adicional donde se confirma la firme intención de abordar el contexto ambiental de manera integral unificando bajo un único sistema

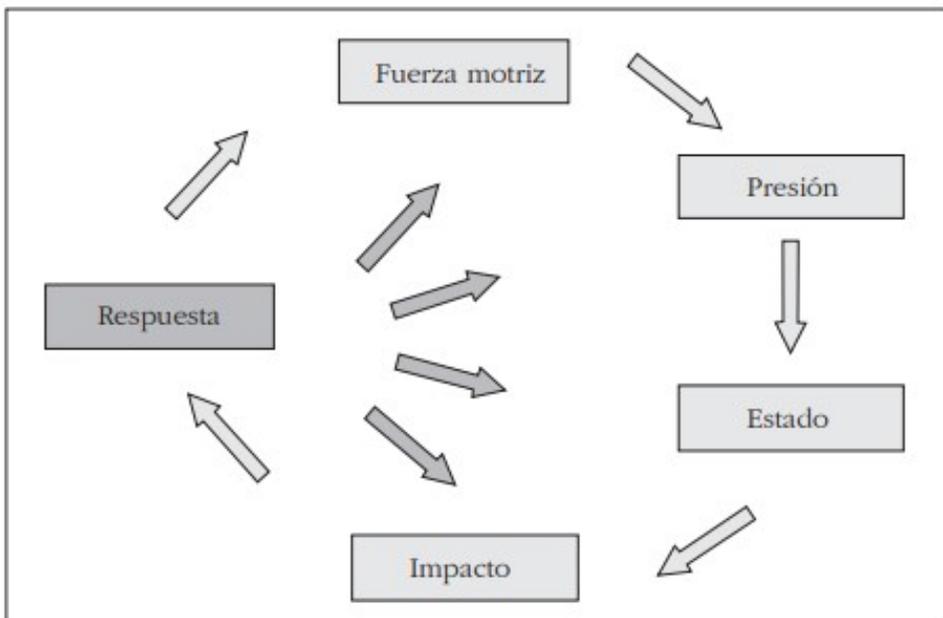
la variable fuerza motriz, que aparecía como desencadenante del conjunto en la interpretación de la realidad ambiental desde un punto de vista más integral. Involucrando el contexto socioeconómico como parte de la situación del medio ambiente en cualquier ámbito de estudio junto con la variable presión que actúa como variable primera en el modelo PER.

Si bien este modelo posee similitudes con los demás en su búsqueda del marco teórico de la situación del medio ambiente en su conjunto, se decanta en su confección por el intento de aglutinar ambos casos de una forma ordenada y causal que en cierta manera dota al sistema de una cierta linealidad imperante.

#### • FPEIR

El último de los cuatro modelos que se van a interpretar en este artículo es el FPEIR, identificado como un avance destacado con respecto a los tres previamente comentados. Considerando la posibilidad de contemplar la fuerza motriz principal que desencadena la presión concreta a la que se ve sometido el medio, y por tanto que acelera la puesta en marcha del procedimiento completo, asumiendo por consiguiente una relación existente entre todas y cada una de las partes con presencia en el modelo.

Figura 1. Esquema del modelo FPEIR.



Fuente: Bobadilla et al. (2013).

Todo ello ilustra la creación de un modelo contemporáneo ligado a la complejidad socioeconómica de los entornos urbanos, aunque también ha sido ampliamente aplicado para diferentes escenarios naturales apropiadamente relacionados con el sector primario. Permitiendo por consiguiente comprender el desarrollo de actividades como la agricultura en nuestro país para la elaboración de proyectos que intentan solventar las dificultades a las que se enfrentan periódicamente.

Este modelo, aunque pueda parecer semejante en cuanto a los criterios de conformación que se disponían en el PER, se encuentra tremendamente alejado de la linealidad propia del anterior para ocuparse de la influencia de las interrelaciones en cada uno de los elementos de estudio. Asemejándose en gran medida al concepto de economía espiral que gana importancia paulatinamente, en el que el seguimiento y la concepción de una gran parte de las interrelaciones existentes crean una influencia fundamentada basada en el seguimiento y análisis de cada uno de los factores individualizados, así como de sus propias relaciones y con el medio que les rodea.

Por lo tanto, este modelo se ha consolidado como uno de los sistemas más completos y significativos para realizar un diagnóstico efectivo del contexto ambiental de multitud de enclaves. Estableciéndose principalmente consecuente para identificar el ciclo completo de impacto de una fuerza motriz específica y como la propia respuesta del ambiente, y su más que posible adaptación, puede influir además en la propia fuerza principal. Contemplando en su caso la generación de posibles sinergias con todos y cada uno de los elementos del proceso.

## **5. Líquenes como bioindicadores contemporáneos**

Si bien es cierto que diversos ejemplos pueden aplicarse a los condicionantes anteriormente descritos, es apropiado mencionar situaciones concretas que puedan servir para representar las nuevas tendencias e indicadores sobre los que se está haciendo actualmente especial hincapié con el objetivo de identificar problemáticas ambientales y más concretamente sobre contaminantes atmosféricos.

Este es caso de los líquenes, que se han consolidado como bioindicadores relevantes en multitud de enclaves y zonas de todo el mundo. Aumentándose como resultado de su eficacia y eficiencia en las últimas décadas exponencialmente el número de publicaciones de índole científica asociadas a estudios de campo con talos líquénicos como protagonistas en relación con variables ligadas a la contaminación atmosférica y de otras tipologías.

Múltiples trabajos científicos también se han realizado a modo de inventario con el propósito de catalogar y clasificar la diversidad líquénica de multitud de entornos naturales y contextos urbanos. Investigaciones que en su conjunto tienen una gran utilidad para la continua mejora en este ámbito y para posibles comparaciones temporales que permitan visualizar variaciones climáticas y de otro tipo debidas a la transformación paulatina de los diferentes enclaves. Aunque no todas ellas incluyen en su interior un análisis detallado sobre la situación ambiental del territorio de estudio en relación con las poblaciones líquénicas apreciadas en el trabajo de campo

ni en ningún caso un análisis comparando los datos obtenidos con variables socioeconómicas propias de la población general.

En este punto podemos encontrar desde artículos enmarcados en la geografía europea como el llevado a cabo por O'Hare (1974) sobre líquenes como indicadores de la calidad del aire en Escocia donde se pone en relieve el componente biogeográfico o artículos publicados cuyos protagonistas son los líquenes ubicados en países nórdicos. De la misma manera, cabe mencionar trabajos en el continente americano en el que se utiliza la diversidad liquénica como herramienta para conocer la calidad del aire en diversas zonas de países como Colombia, Ecuador o Argentina.

Mencionando también la prolífera escuela italiana con Pier Luigi Nimis como uno sus principales referentes con participación de decenas de artículos de estas características. Además del Reino Unido que se presenta como uno de los grandes exponentes en la materia con personalidades como Rose o Hawksworth que por si no fuera poco también han participado en numerosas investigaciones fuera del territorio británico.

Sin olvidar en ningún punto la importancia de la investigación española en este ámbito específico, con grandes exponentes alrededor de nuestra geografía que han conllevado la aparición de multitud de artículos y publicaciones en prácticamente la totalidad de las Comunidades Autónomas españolas. Entre las que se encuentran aquellas que comenzaron a realizarse en la década de los 70 en la capital como es el caso de Crespo et al. (1977) donde se propuso un primer estudio para contemplar la relación entre líquenes en determinados enclaves de la urbe madrileña y la contaminación existente en dichas zonas de la capital. Otros ejemplos adicionales en este aspecto incluyen otras ciudades nacionales como Valencia o A coruña, dando pie a la consideración de España como uno de los países europeos con mayor trayectoria en este ámbito.

Con todo ello se contempla una mejora considerable del conocimiento actual sobre el contexto liquénico internacional, incluyendo determinadas especies que han sido incluidas en los últimos años en Listas Rojas de protección debido al deterioro de las poblaciones que conformaban en muchos contextos. Por lo tanto, el auge en este tipo de investigaciones viene enfocado por el interés actual por estos organismos en virtud de su relación con diversos contaminantes lo que ha supuesto un punto de inflexión en su conservación dentro de una gran parte de ambientes entre los que se incluye el metropolitano.

Sin embargo, el potencial de los talos liquénicos como indicadores desde un punto de vista multidisciplinar aún está completamente por determinar. Puesto que es cierto que se ha conseguido descifrar su eficacia en el momento de actuar como bioindicador en relación con la contaminación desde un enfoque más vinculado al medio ambiente. No obstante, su utilización más allá de su aplicación actual como otro tipo de indicador para parámetros de carácter social o económico no ha sido ni siquiera propuesta ni estudiada en ningún contexto. Por este motivo su futuro en este ámbito en la actualidad sigue siendo una incógnita, ya que la investigación ligada a estos organismos como indicadores más allá del contexto ambiental no ha sido puesta a prueba.

Hay que mencionar, por último, que los líquenes al establecerse como bioindicadores efectivos, poseen la capacidad de reaccionar frente a comportamientos de carácter antrópico por lo que es posible que también puedan ejercer como indicadores asociados a la movilidad o peculiaridades de la población que habita en enclaves concretos.

## **6. Concepción y utilidad de líquenes en relación con actividades antrópicas**

Si bien los talos liquénicos están presentes en prácticamente la totalidad de entornos existentes en el planeta, su definición y caracterización sigue siendo en la actualidad una tarea compleja. En primer término, los líquenes pueden ser entendidos de forma genérica como la asociación simbiótica entre un hongo y un simbiote fotosintético cuya interacción da lugar a un talo estable. Aunque, es preciso matizar que, a pesar de estar conformados por dos componentes firmemente diferenciados, los líquenes se comportan de manera singular. Afianzando su identidad propia como unidad biológica individual y aplicando en consecuencia una distinción con respecto al conjunto restante de hongos y algas que no incurrir en este tipo de simbiosis.

A pesar de no ser comúnmente reconocidos por el grueso de la ciudadanía en numerosas ocasiones, lo cierto es que los líquenes han sido y siguen siendo empleados en multitud de contextos donde tienen un papel principal asociados a actividades antrópicas. Muchas veces en aplicaciones totalmente desconocidas para gran parte de la población. Como parte de este argumento se puede destacar que estos organismos ya fueron utilizados en el Antiguo Egipto por sus cualidades antimicrobianas o sus aplicaciones tradicionales en la industria farmacéutica, perfumería o cosmética. Además de generar tintes naturales muy empleados en la industria textil que conforman parte de la ropa que se fabrica en diferentes enclaves en el contexto internacional.

Genéricamente inmerso dentro de esta asociación, el hongo recibe el nombre de micobionte mientras que el organismo fotosintético se denomina fotobionte. En este sentido, según se indica en Margulis (1993), los líquenes pueden ser comprendidos como un claro ejemplo del potencial de la integración de los simbioses para participar en la creación de nuevas relaciones entre distintos organismos, constituyendo, además, un mecanismo de innovación evolutiva con efectos morfogenéticos.

Generalmente, los talos liquénicos suelen estar representados por un hongo ascomiceto pese a que también se conocen variedad de situaciones donde el representante fúngico se asocia con hongos basidiomicetos (los cuales son notablemente menos comunes) o incluso deuteromicetes, en ocasiones especiales.

En el aspecto opuesto, aparece las posibilidades que ofrecen los posibles organismos que pueden actuar como fotobiontes, puesto que según se señala en Aragón et al. (2001), solo se conocen alrededor de 30 géneros que dar lugar a estructuras liquénicas. Sin embargo, y a pesar de que lo más habitual es encontrar

como simbiote fotosintético a un alga cloroficea, también se pueden apreciar líquenes configurados por cianobacterias.

De hecho, una inmensa de los talos observados en el contexto internacional por autores de diversa formación y características están conformados por algas verdes como fotobiontes principales. Aunque existe cierto tipo de liquenización cuya estructura se dispone a través de tres simbioses, un micobionte y dos organismos fotosintéticos, un alga y una cianobacteria en estos casos concretos, pese a que su presencia es notablemente poco común.

Además de lo anterior, es preciso resaltar que en la gran mayoría de situaciones el micobionte aparece como dominante dentro del propio del talo, aunque en caso existen organizaciones donde el fotobionte ejerce ese mismo papel. Sin embargo y pese a la circunstancia previa, las especies líquénicas son generadas y catalogadas a partir del representante fúngico.

Estas generalidades constituyen la composición básica de los líquenes, popularmente conocida y considerada por la comunidad científica, como veraz y prácticamente inamovible desde los comienzos del estudio asociado a estos organismos.

No obstante, estas consideraciones básicas sobre los talos líquénicos han sufrido una notable modificación conceptual, a raíz de un descubrimiento novedoso. Puesto que según lo publicado por Spribille et al. (2016) una buena parte de los líquenes más conocidos estarían configurados por un representante fúngico ascomiceto, un simbiote fotosintético, y sorprendentemente, trazas de hongos basidiomicetos situados en el córtex del talo.

Una nuevo contexto que ha transformado la apreciación científica sobre los líquenes, debido a que la idea general pretéritamente confeccionada sobre estos organismos consistente en el producto de una simbiosis entre un hongo y un simbiote fotosintético o en ocasiones especiales por dos fotobiontes, cambia considerablemente hasta el punto de comenzar a comprender que en el interior de algunos talos, coexiste la presencia de componentes propios de hongos ascomicetos y basidiomicetos complementariamente.

Por lo que este contenido de reciente reconocimiento ejerce como nuevo acicate sobre las bases de líneas de investigación anteriormente inverosímiles ligadas con la estructura básica de los talos líquénicos. Pese a que aún es pronto para poder acotar las posibilidades de este descubrimiento, parece factible que a través del uso de nuevas tecnologías y la ampliación paulatina del número y contenidos de las investigaciones se pueda ampliar notablemente nuestro discernimiento sobre los líquenes. Haciendo especial énfasis en la idea de la cantidad de peculiaridades y posibilidades que hoy en día no han sido explotadas y que siguen siendo desconocidas en relación con éstos.

Retornando a los aspectos generales, hay que destacar que los talos líquénicos poseen ínfimas habilidades competitivas, si los comparamos con otros briófitos como los musgos y con las plantas vasculares. Por ello, es de vital trascendencia para su supervivencia y desarrollo albergar la posibilidad de establecerse en substratos de todo tipo. Lo cual no quiere decir que no haya lugar a llevar a cabo competencia entre

distintas especies liquénicas puesto que ésta acaba teniendo un papel relevante en la sucesión posterior.

En relación con lo anterior, cabe destacar otra de las grandes propiedades de estos organismos como su capacidad para fijar nitrógeno atmosférico. Una característica propia no solo primordial para su propia evolución y la de los ecosistemas adyacentes sino también de relevancia para contrarrestar las grandes cantidades de nitrógeno que acaban depositándose en la atmósfera.

Prosiguiendo en la argumentación de las generalidades liquénicas, se puede resaltar la habilidad que poseen de almacenar en su interior diversas sustancias contaminantes. Una peculiaridad que ha sido utilizada desde hace décadas para el estudio y la investigación de contaminantes atmosféricos y que se corresponde con la funcionalidad de los talos liquénicos de ejercer como biomonitores.

Según Hawksworth y Colwell (1992), se considera como biomonitor aquel organismo, cuya distribución o población, puede ser estudiada y comparada a lo largo de determinados periodos de tiempo a través valores estándar. Esta sincronía constata que los líquenes, son organismos especialmente interesantes para el control (tanto cuantitativo como cualitativo) de contaminantes sin la necesidad específica de establecer un sistema complejo de medición de estas sustancias.

Pese que no finalizan en este punto las características relacionadas con el objeto de este estudio, puesto que hay que añadir a sus potencialidades la función de bioacumuladores, permitiendo que puedan obtenerse datos de carácter cuantitativo, acerca de la concentración de compuestos nocivos en el interior de los diferentes talos liquénicos a través de diversos métodos químicos.

Pese a que esta funcionalidad, de utilidad para estudios de ámbito ambiental, ocasiona a los propios líquenes perturbaciones de orden morfológico llegando en los casos más extremos a causar su propia muerte. La imposibilidad de los talos de expulsar las sustancias contaminantes que se filtran en su interior hace que en localizaciones donde existen altas concentraciones de contaminantes atmosféricos puedan acabar con su supervivencia en todo tipo de sustratos.

No obstante, al igual que la presencia continuada de sustancias nocivas puede desencadenar la desaparición de poblaciones liquénicas con más frecuencia de la deseada, una mejora en las condiciones ambientales, fundamentada en una disminución en las concentraciones de contaminantes dispersos en el aire, produce el resurgir de estas poblaciones con relativa facilidad.

Consecuentemente un enclave sin presencia de líquenes o con una biodiversidad limitada en la actualidad como resultado del alto grado de contaminación existente podría ser colonizado por poblaciones liquénicas en cuanto se produjese una mejora estable de la situación.

De hecho, la relevancia de los líquenes se extiende más allá de la información que puedan aportar debido a que su protagonismo en la naturaleza se entiende como esencial para la supervivencia de otras especies animales y vegetales, así como para la conservación y desarrollo de los ecosistemas.

Siendo especialmente conscientes de que determinados individuos liquénicos pueden hallarse en ecosistemas maduros y con un estado óptimo de conservación

poseyendo tan solo de unos pocos centímetros de superficie y de espesor. Una circunstancia que no determina su antigüedad como organizaciones puesto que talos de unos pocos centímetros de anchura y longitud pueden ser desencadenantes de décadas de desarrollo y adaptación.

A raíz de lo anterior, los líquenes desarrollan adicionalmente una estrategia alternativa que puede interpretarse como una habilidad específica y que puede alcanzar el extremo, entendiendo que éstos son organismos que han demostrado una gran resistencia a condiciones realmente difíciles. Poelt (1973) describió lo que se ha venido a llamar como estados especiales de resistencia, donde estos seres frente a situaciones ambientales realmente complejas son capaces de suprimir su crecimiento para poder sobrevivir.

Posteriormente a la exposición de las peculiaridades más relevantes que conciernen a los talos liquénicos, es también consecuente comentar detalles congruentes referentes a los aspectos morfológicos más representativos de momento de adentrarse en su anatomía y morfología para su mayor comprensión. En este sentido, se analizará su composición general en primera estancia para el posterior estudio de las diversas estructuras que tienen lugar en multitud de líquenes y que constituyen un elemento de vital importancia en su identificación taxonómica.

Consecuentemente con este aspecto concreto, cabe destacar una primera clasificación liquénica, donde se constata la división de los talos en función de su organización interna y estructuras asociadas dando lugar a líquenes de estructura homómera y heterómera. Por una parte, aquellos que conforman los líquenes homómeros, cuentan con una irregularidad estructural en la que el fotobionte se expande por una gran superficie del talo. Mientras que los heterómeros, poseen una organización más reconocible donde el fotobionte suele estar claramente acotado entre estratos o capas dispuestas de manera horizontal.

Aunque a grandes rasgos, es preciso destacar que la gran mayoría de los líquenes se ubican bajo la categoría de estructuras heterómeras, donde se produce una estratificación de capas más o menos regular, aunque derivada de una gran complejidad interna. Esta regularidad hace que se puedan identificar una serie de partes comunes a la mayoría de estos talos.

Estos aspectos, así como su variabilidad fisiológica y morfológica hacen que su clasificación sea extensa y delicadamente compleja. Pese a que ésta tiende a ejecutarse en función de sus relaciones con el sustrato sobre el que se disponen.

De hecho, el éxito de la colonización primaria asociada a los líquenes guarda una estrecha relación con la gran variabilidad de sustratos, en algunos casos ciertamente variopintos, donde diversas especies de líquenes se desarrollan y por lo tanto pueden ser observados. A través de distintas investigaciones ligadas con la ecofisiología (rama de la ecología que investiga los fenómenos fisiológicos en el medio natural), se ha podido determinar que el tipo de sustrato condiciona el crecimiento y la distribución de estos organismos.

Con ello en mente, se puede generar una primera clasificación en función de los sustratos sobre los que se posicionan: cortezas arbóreas (epífitos); rocas (saxícolas);

cutícula superficial de las hojas de plantas vasculares (folícolas), o incluso directamente estratos edáficos superficiales (terricolas).

Pese a que su manera más extendida de ser clasificados parte de la identificación de distintas formas de crecimiento y el establecimiento de diferentes biotipos. Una manera identificativa que emplea desde el siglo XVIII por científicos de la talla de Acharius como se comenta en Barreno y Rico (1984), pese a que esta clasificación no se constituye como un carácter taxonómico sino como una unidad fisiológica y morfológica.

Los primeros en cuanto a este criterio se establecen los denominados líquenes crustáceos caracterizados por su firmeza a la hora de fijarse al sustrato, de hecho, no es posible despegarlos del mismo sin destruirlo. Razón principal por la que el trabajo de campo y el posterior en el laboratorio con esta tipología líquénica se convierte en una tarea más que complicada. Representando el biotipo líquénico más resistente a la contaminación de toda índole, siendo por consiguiente los mejor adaptados y más representativos en contextos metropolitanos.

El siguiente grupo, lo configuran los talos foliáceos cuya peculiaridad principal consiste en que permanecen unidos al sustrato tan solo parcialmente. Fácilmente identificables en el medio natural, se caracterizan por su simetría dorsiventral y por su organización interna.

El tercer biotipo está integrado por los líquenes fruticulosos, muy llamativos por su morfología en forma de ramificación. Destacando por su alta tasa de crecimiento y por su reducido número de especies en relación con los dos biotipos anteriores. Constituyen el biotipo más frágil ya que solo se encuentran ligados al sustrato por una parte pequeña de su estructura por lo que están muy expuestos fenómenos meteorológicos muy adversos que pueden terminar por separarlos del mismo.

Además de todo de lo previamente mencionado, se establecen como el biotipo los más sensible con respecto a la contaminación. Siendo prácticamente imposible observarlos en núcleos urbanos (salvo en casos muy concretos), apareciendo en localizaciones contadas y con condiciones climáticas favorables.

Otro de estos biotipos (aunque menos generalizado) lo constituyen los líquenes gelatinosos, los cuales adquieren dos morfologías muy diferenciadas teniendo en cuenta la presencia o ausencia de agua. Su denominación se debe a su apariencia gelatinosa en condiciones de humedad cuando se vuelven blandos y flexibles, llegando incluso a convertirse en traslúcidos en condiciones de abundante agua.

## **7. Consideración de los líquenes como bioindicadores ambientales**

El origen de la consideración de los líquenes como organismos capaces de actuar como bioindicadores ambientales se ubica en el siglo XIX, momento en el que el científico británico Leopold Grindon presenció y referenció una preocupante disminución de las poblaciones líquénicas en la zona sur del condado de Lancashire, como resultado de un incremento prolongado de la contaminación atmosférica como se especifica en Grindon (1875).

Una década después, como consecuencia directa de las investigaciones ligadas al estudio líquénico parisino fue el momento de inflexión en el que se confirmó que estos organismos podían ejercer como bioindicadores ambientales como se deriva de la investigación vinculante ejecutada y publicada en Nylander (1866).

Por otra parte, Hawksworth y Rose (1976) señalan los comienzos del siglo XX, como un punto de inflexión en la consolidación de la consideración líquénica como instrumento de gran utilidad para reflejar las consecuencias ambientales del aumento paulatino de la contaminación atmosférica.

En Hawksworth y Rose (1976) también se hace hincapié en una serie de características propias para cada una de esas zonas. Las cuales deben ser diferenciadas en función del cumplimiento de ciertos criterios y por ende establecer delimitaciones entre ellas. Mencionando una parte externa caracterizada por una vegetación líquénica bien asentada y diversa, situándose alejada de las principales fuentes de emisión y por lo tanto poco afectada por la influencia de la contaminación. Una segunda zona que se configura a modo de transición entre las otras dos, dando lugar a la aparición de algunos individuos líquénicos dispersos de biotipo fruticulado y foliáceo. Y una última zona interior denominada como desierto líquénico, donde destaca la ausencia de poblaciones líquénicas bien desarrolladas y donde es prácticamente imposible encontrar líquenes de tipo foliáceo y fruticulado.

Teniendo en cuenta por consiguiente que esta diferenciación se encontraba estrechamente con la disposición socioeconómica de las ciudades. Un hecho que se introdujo como una gran novedad para la época y daba lugar con un alto nivel intrínseco de coherencia a una de las primeras metodologías de estudio y de representación geográfica de las poblaciones líquénicas.

Sin embargo, el recorrido necesario para proceder a la aplicación de esta zonificación de una forma práctica en la realidad no ha sido una labor sencilla. De hecho, nunca ha sido considerada como una clasificación estrictamente cerrada ya que siempre ha estado permanentemente sujeta a una cierta flexibilidad dependiendo de las características intrínsecas de los distintos territorios de estudio, la ubicación de las potenciales fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos y la influencia de otros factores naturales.

No obstante, esta zonación ha sido estrechamente ligada con los distintos tipos y grados de contaminación atmosférica existentes. Una circunstancia ha provocado diversas alteraciones morfológicas y fisiológicas en los talos a través de la investigación continuada en esta materia. Siendo preciso recordar que los líquenes no solo responden ante los cambios ambientales, sino que también son capaces de captar y absorber sustancias contaminantes presentes en el agua y en forma de gas.

La puesta en marcha de la nueva metodología de zonación, resultó ser realmente determinante en el desarrollo de nuevos mapas de contaminación asociados a las dinámicas de campo protagonizadas por líquenes. Un motivo que fue relevante para el inicio de la configuración de mapas de isolíneas y para la distinción de diversas zonas de isocontaminación teniendo en cuenta múltiples características de los talos líquénicos como su abundancia, diversidad, distribución o cobertura.

Estas representaciones sirvieron para referenciar múltiples fuentes contaminantes y señalar la influencia específica de determinados compuestos. Puesto que como se evidenciaba no todos los contaminantes afectan de la misma manera a las poblaciones líquénicas ni todas las especies de líquenes ofrecen la misma respuesta frente a ellos. Contaminantes sobre las que se apreciaba una clara reacción y cuyas concentraciones habían aumentado considerablemente en el seno de las grandes ciudades.

En este punto se pone de manifiesto la asociación de varios de los contaminantes históricos más estudiados se encuentran con los denominados gases de efecto invernadero, el dióxido de azufre o los metales pesados. Sin embargo, no hay que olvidar el papel de la continua investigación en este ámbito ha ido determinando nuevos compuestos nocivos como el ácido nítrico o los compuestos halogenados.

Esta variedad de compuestos nocivos y tan heterogéneos provoca con cierta frecuencia multitud de respuestas diferentes que han sido observadas y referenciadas en función del tipo y grado de contaminación, así como de la especie líquénica. Siendo común apreciar cambios de coloración, aparición de manchas blanquecinas o secreción cérea entre otras.

Pero no solamente los líquenes son capaces de actuar como organismos bioindicadores de manera muy eficaz, como se ha comentado a lo largo de este apartado. Su relación con los diversos contaminantes va más allá de una respuesta fisiológica o morfológica, ya que son capaces de absorber y almacenar determinadas concentraciones de contaminantes en su interior a través de disolución acuosa o de su captación directa desde la atmósfera.

Este hecho hace que el estudio detallado del interior de los talos líquénicos proporcione información realmente valiosa, ya no solo para conocer los propios contaminantes que existen en el ambiente próximo sino para averiguar los valores cuantitativos asociados a las concentraciones de cada uno de ellos a través del desarrollo continuado de nuevas tecnologías. Una posibilidad más que interesante, puesto que estos valores obtenidos pueden ser correlacionados con las concentraciones de esos contaminantes presentes en el entorno.

Por lo tanto, todas estas posibilidades hacen que los líquenes no sean solo considerados como muy buenos bioindicadores de la contaminación atmosférica, sino que también son muy apreciados por su faceta como biomonitores y bioacumuladores. Estando aún por analizar la cantidad de usos diferenciados que pueden resultar como fin último de esta triple funcionalidad que los convierte en uno de los organismos que proporcionan información más completa en relación con la contaminación atmosférica.

## **8. Potencial líquénico como indicadores de segunda y tercera generación**

Una vez analizada la historia, la actualidad y la importancia del estudio líquénico durante las últimas décadas principalmente desde una perspectiva principalmente ambiental, es preciso dedicar un espacio en esta investigación para dilucidar las posibilidades que ofrecen al referenciar aspectos múltiples de la sociedad.

Derivado de lo anterior, es preciso focalizar en aquellas variables del conjunto metropolitano donde a partir del estudio prolongado de campo de líquenes epífitos se podría generar una nueva vertiente de información y datos sobre la realidad de las ciudades en el contexto internacional, puesto que en una buena parte de ellas hay presencia de talos liquénicos.

Dejando a un lado las virtudes de estos organismos como bioindicadores y sus características que los colocan muy próximos a las concepciones de biomonitores y bioacumuladores enfocados principalmente en la repercusión de su relación con los contaminantes atmosféricos. Es palmario que merece la pena adentrarse en su vinculación con otro tipo de factores ambientales, además del comentado, que pueden llegar a guardar una estrecha relación con las poblaciones de líquenes dispuestas en diferentes zonas de los contextos urbanos. Pero no solamente de índole ambiental, sino que también cabe ahondar en su vinculación con otros parámetros de tipo social y económico que a menudo son recopilados con carácter anual en muchas urbes alrededor del mundo. Sin embargo, su análisis y asociación con los valores de diversidad liquénica no han sido determinados en ninguna de las publicaciones históricas que se han analizado a lo largo de este trabajo por lo que su relación o no es completamente una incógnita.

Dando pie a que estos organismos puedan ejercer funciones adicionales a las actualmente conocidas, previamente delimitadas, para actuar como indicadores de primera, segunda y tercera generación. Primeramente, en paralelo con los modelos históricos desarrollados por la OCDE, pero además en concordancia con el resto de parámetros valorados en su totalidad en múltiples contextos que podrían dar una dimensión adicional a los líquenes como indicadores ambientales. Aunque añadiéndoles su relevancia en los aspectos social y económico del conjunto de la población.

Dichas variables referidas en este apartado pueden agruparse en tres tipos principales donde se integran multitud de parámetros que en algún punto puedan ser correlacionados con el estudio liquénico.

•Social: dentro de este tipo podemos identificar los parámetros más estrechamente unidos al conjunto demográfico de cada territorio concreto y entre los que se puede destacar los siguientes:

- Número de habitantes
- Edad media de la población'
- Índice de mortalidad
- Índice de natalidad
- Índice de reemplazo de la población activa

•Económico: incluido en este grupo se encuentran aquellos parámetros que aparecen vinculados a los aspectos crematísticos existentes en la totalidad de las áreas metropolitanas.

- Renta media
- Solicitudes Ingreso Mínimo Vital
- Valor catastral de la vivienda
- Número de habitaciones de hotel

● Ambiental: en el interior de esta tipología se enmarcan los parámetros ligados a la vertiente medioambiental existente en el seno de los contextos metropolitanos.

- Hectáreas de zonas verdes
- Número de árboles
- Residuos generados por habitante

## **9. Tecnología como Sistema de vigilancia de la calidad del aire: el caso de la ciudad de Madrid**

Como consecuencia directa de la progresiva adecuación, implementación y ejecución de la normativa más restrictiva en el aspecto ambiental, así como el aumento de las preocupaciones administrativas y populares ligadas a la sostenibilidad, se ha posibilitado la instauración y desarrollo de redes tecnológicas integradas por estaciones de diversas tipologías en múltiples metrópolis internacionales. Lo que ha posibilitado la consecución una estabilidad relevante en la obtención de datos sobre contaminantes atmosféricos, aunque siempre asociados a grandes niveles de inversión.

Entendiendo además que el control y la vigilancia en esta categoría no es una actividad fija, sino que necesita ser actualizada paulatinamente para dar servicio a las necesidades de la ciudad y a las fuentes de contaminación que se suceden paulatinamente a lo largo del tiempo.

Fijando el punto de mira en este aspecto, es procedente considerar alguna de las grandes urbes continentales donde estas herramientas se han puesto al servicio de la ciudadanía como es el ejemplo de Madrid.

En la actualidad, la red implementada en la ciudad de Madrid está integrada por 24 estaciones remotas automáticas de medición y control dispersas en la totalidad de la ciudad además de tres puntos de muestro manual de PM<sub>2,5</sub> ubicados en Farolillo, en la J.M. de Moratalaz y en el C.C. Alfredo Kraus. Todas ellas configuran un método estable y completo que permite conocer la situación de la urbe madrileña en su conjunto y de forma general.

Por otra parte, es preciso hace referencia a la relevancia de ciertos enclaves de la ciudad en función de la presencia de estaciones y de los niveles de contaminación asociados a las actividades que se desarrollan en las distintas zonas de la ciudad. Estas razones hacen que las estaciones que integran el sistema general midan diferentes contaminantes atmosféricos teniendo en cuenta el emplazamiento donde se encuentran ubicadas y anuncian cierta heterogeneidad en dicho sistema.

Todas ellas hacen que a día de hoy el sistema se encarga de obtener datos de dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono, monóxido de carbono, metales

pesados, partículas de pequeño tamaño ( $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$ ), BTX (benceno, tolueno y xileno) y B(a)P.

Además de la diferencia anterior también existen diferentes tipologías de estaciones en función de su ubicación concreta y su funcionalidad dentro de la gran urbe dividiéndose en: urbanas de tráfico, urbanas de fondo, suburbanas, puntos de muestro de metales pesados y puntos manuales de toma de datos de  $PM_{2,5}$ . Esta clasificación se constituye como elemento limitante a la hora de incorporar nuevas tecnologías de análisis de contaminantes.

De forma análoga a todas las estaciones fijas y unidades móviles, se establece una red de meteorología que permite determinar los parámetros climáticos más representativos a la hora de comprender la situación y los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en el término municipal madrileño.

Se trata de obtener información de tipo meteorológico de forma conjunta a través de 24 estaciones que aportan datos de velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, radiación solar y precipitación. Aunque es preciso detallar que no todas ellas poseen equipos y sensores para cuantificar todos los parámetros comentados anteriormente, sino que de la misma forma que ocurre con los compuestos en las estaciones fijas, su ubicación determina la obtención de unos valores u otros. Matizando que los emplazamientos de todas las estaciones meteorológicas no concuerdan con las localizaciones de las estaciones fijas que integran el sistema de vigilancia.

Realmente se trata de parámetros muy importantes, ya que como hemos comprobado durante este trabajo, la interacción entre los parámetros meteorológicos y los contaminantes atmosféricos tienen una trascendencia a la hora de generar perjuicios para el medio ambiente en su conjunto y para la calidad de vida de la población.

De hecho, la información de tipo meteorológico es fundamental para la fiabilidad del sistema de predicción de la ciudad que lleva en funcionamiento desde el año 2002 y que se constituye como una herramienta fundamental para poder prevenir problemáticas de carácter atmosférico.

Todo lo anterior es una muestra fehaciente sobre la idoneidad y la inversión económica que la ciudad de Madrid ha realizado durante años para poseer unos de los sistemas de vigilancia más completos y representativos de España, de todo el territorio continental y gran parte de las grandes urbes alrededor del mundo.

Sin embargo, las posibilidades económicas en múltiples ciudades y países no corresponden con frecuencia con las existentes en la capital española. Y mucho menos si tenemos en cuenta las prioridades de diversos territorios entre las que no se encuentra la sostenibilidad como parte principal ni por consiguiente la instauración de un sistema de vigilancia ambiental como en el caso madrileño.

Es precisamente en este punto concreto donde los líquenes pueden tener una relevancia considerable a la hora de establecer un control ambiental en diferentes partes del mundo. Además de propiciar otro tipo de estudios y generar información de importancia mucho más completa en el momento de ahondar en la relación entre los talos liquénicos y variables de índole socioeconómica.

## 10. Aplicación de líquenes en el desarrollo de estrategias educativas de índole ambiental

Durante este trabajo de investigación se han analizado diversos aspectos de gran importancia e interés ligados a la biodiversidad líquénica especialmente en entornos urbanos, atendiendo a las grandes posibilidades que otorgan estos organismos a la hora de ejercer como bioindicadores de la contaminación atmosférica. No obstante, de forma complementarias es interesante poner el foco en otra de las potenciales utilidades que conlleva el estudio minucioso de talos líquénicos como es conformar una herramienta de educación ambiental para el conjunto de la población.

La comprensión de la labor educativa de carácter ambiental a lo largo de los años ha conllevado e integrado el objetivo de desarrollar una conciencia ambiental totalmente implementada entre la población partiendo de un conocimiento elevado del medio que nos rodea. Ejerciendo un interés añadido en complementar el hecho anterior con la posibilidad de asentar una serie de valores relevantes en el devenir futuro de los comportamientos antrópicos.

Si bien es cierto que, en el caso de numerosos enclaves y ecosistemas, el estudio de campo de líquenes epífitos se ha probado con resultados satisfactorios, haciendo especial hincapié en su viabilidad para ejercer como aulas naturales del conocimiento. No es menos cierto que han tenido un papel clave en la recreación de una identidad cultural con respecto a dichos espacios naturales. Dando paso a la idoneidad de la utilización de los talos líquénicos como parte integrante del medio puede ser de gran ayuda para conformar programas de concienciación y educación ambiental.

Aunque sin perder el foco en que el aspecto limitante para lograr la atracción popular en el estudio líquénico es propiciar la existencia de múltiples actuaciones de gran relevancia para la comunidad científica que no requieran de un gran conocimiento previo de la materia con anterioridad.

Una circunstancia que convierte a las poblaciones líquénicas en altamente especiales para la inclusión de la ciudadanía en su totalidad en las dinámicas ambientales, sin que determinadas variables que actúan en algunos casos como prejuicios como pueden ser los diferentes tramos de edad o la formación profesional tengan una influencia determinante en la participación general en actividades educativas ligadas al medio ambiente. “Esta clase de estudios puede servir para ilustrar los distintos efectos que provocan los seres humanos sobre los diferentes organismos” (Hawksworth y Rose, 1976, 56).

Actividades tan relativamente simples como detectar la presencia de líquenes epífitos en cortezas arbóreas, rocas o elementos del mobiliario urbano en el caso de entornos metropolitanos pueden ejercer como elementos desencadenantes de la detección precoz de problemáticas ambientales a la par que contribuir a la concienciación ambiental popular también en el contexto urbano.

Es precisamente por la sencillez asociada a la relevancia y la utilidad de los resultados obtenidos, las circunstancias esenciales por las que el estudio líquénico ha ganado enteros en las últimas décadas dentro de estrategias y programas de educación ambiental. Contribuyendo por consiguiente a la adquisición de conocimientos, valores,

actitudes y comportamientos que disparen la capacidad crítica de la población, así como el desarrollo de capacidades individuales y colectivas encaminadas a contribuir a la consecución del tan ansiado desarrollo sostenible.

Por ello el empleo de estos organismos como punto de partida de la investigación ambiental y la expansión de una materia esencial para el devenir futuro de la sociedad como la educación ambiental son fundamentales para conseguir una serie de objetivos de interés de cara a la comprensión del entorno y la concienciación popular en el contexto ambiental.

Experiencias previas de carácter similar en diferentes entornos han dado muestras satisfactorias en cuanto a la motivación estudiantil en referencia a la obtención de resultados significativos a partir de la observación líquénica en áreas potencialmente contaminadas y poco analizadas en esta materia. En este sentido, Méndez et al. (1999) corroboran el éxito del estudio superficial en temática líquénica en estudiantes universitarios en diversos lugares de América Latina.

De hecho, este tipo de proyectos se han ido implementando paulatinamente con cierta frecuencia en ciertas partes del territorio latinoamericano tras la visualización prolongada de sus ventajas tanto en sus aportaciones en lo relativo a las contribuciones de carácter científico como las de tipo educativo y en el campo de la concienciación social ligada al medio ambiente.

Aunque debemos ser conscientes de la existencia de múltiples características que influyen determinantemente en el desarrollo líquénico y que deben ser consideradas en el momento de planificar las actividades pertinentes en este contexto.

Sin embargo, estas actividades pueden llegar a jugar un papel decisivo para la consecución de una serie de metas significativas en referencia a la ciudadanía en su conjunto, sobre todo prestando especial atención a aquellas personas cuyas motivaciones en el aspecto ambiental no se encuentran consolidadas.

Algunas de las cuales pueden resultar fundamentales para la conservación del medio natural en su conjunto como se aprecia en las siguientes metas:

- Dar a conocer, enseñar y concienciar de las principales problemáticas ambientales existentes en las ciudades, y su propia función a la hora de establecer sus posibles soluciones.
- Fomentar la participación, cooperación y trabajo en equipo desde una perspectiva ambiental partiendo de un ambiente dinámico y educativo.
- Comprender las capacidades y características ocultas de los briófitos, y más concretamente de los líquenes, en lo relativo a la mitigación y a la vigilancia de los contaminantes urbanos.

A pesar de que ciertamente estos objetivos son una muestra sencilla de todos aquellos que se pueden llegar a pretender conseguir en virtud de la utilización de líquenes como herramienta educativa y como elemento de estudio para investigaciones de carácter multidisciplinar asociadas al medio ambiente.

Sin embargo, en la búsqueda de la potenciación de una serie de prácticas satisfactorias vinculadas a la temática de estudio es relevante relacionar la información recopilada con el desarrollo de actividades que ejemplifiquen su

relevancia y sirvan como incentivo palpable para la continuidad de ejemplos positivos en este ámbito.

Dado que para la consecución de todos ellos es imprescindible tener en cuenta diversos conceptos básicos que desempeñen una función principal en el desencadenamiento de las verdaderas pretensiones de esta clase de proyectos: desinformación (como una aptitud previa que transformar durante la realización de las actividades), actitud (entendida como elemento fundamental posterior a la primera toma de contacto con la temática en cuestión siendo necesaria para alcanzar cierto grado de concienciación) o comportamiento (asociado a la idea de actitud siempre respetando el medio natural y garantizando su conservación a la par que su sostén en tiempo futuro).

Por lo tanto, en el momento de presentar un programa de estas características se debe considerar como un instrumento que pretende satisfacer y aumentar las competencias de la población en lo relativo a la educación ambiental. Partiendo de la enseñanza y el desarrollo de contenidos ligados a la biodiversidad, la contaminación urbana, el conocimiento del medio ambiente urbano y principalmente la conexión entre todas las características anteriores y las poblaciones líquénicas.

Todo ello a raíz de establecer un análisis profundo del ámbito de estudio y a través de una metodología participativa donde la ciudadanía ejerza como partícipe principal de las diversas actividades al mismo tiempo que interactúa con los distintos estímulos asociados a la necesidad de conservación del medio ambiente.

## **11. Impacto, viabilidad, adecuación y transferencia de la aplicación líquénica como herramienta ligada a la educación ambiental**

En concordancia con todo lo expuesto previamente es preciso vislumbrar una serie de variables fundamentales que deben ser incorporadas a las estrategias educativas que se transformen de forma final en proyectos asociados con la educación ambiental y otras disciplinas de vanguardia cuyo protagonismo ha aumentado exponencialmente generando nuevas herramientas en el aspecto social y en la visión multidisciplinar del medio ambiente como las ciencias ambientales o la bioética.

Derivado de lo anterior cabe señalar los siguientes aspectos de análisis cuya incidencia en el resultado de la aplicación de las estrategias educativas se antoja firmemente relevante.

**Impacto:** una condición que está sujeta a una doble vertiente en un sentido claro de reciprocidad. Entendido por una parte como el impacto que genera la actividad humana en el medio al desarrollar la actividad y por otra parte el impacto generado por el estudio líquénico en la conciencia ambiental de los participantes.

Siendo de todo punto innegable que un proyecto sobre la biodiversidad puntualizando sobre el papel de la temática líquénica, orientado hacia participantes sin un conocimiento exacerbado de la materia y con una motivación clara por participar en una dinámica útil, tendrá efectos tanto directos como indirectos sobre las personas a las cuales va dirigido.

**Viabilidad:** desde el punto de vista de esta característica, proyectos de esta índole presentan multitud de ventajas que deben ser puestas en valor a la hora de ofertar la participación en ellos.

Principalmente enfocadas desde una vertiente económica puesto que estas actividades no conllevan costes elevados en su estudio al ser elementos que se establecen naturalmente en el medio. Por lo que no conllevan costes elevados en materia de desplazamiento ni materiales específicos para esta cuestión, más allá de las explicaciones generalistas de expertos en la temática o de aspectos bibliográficos que pueden ser interesantes por su contenido para fomentar el conocimiento y el interés entre la población.

Aunque en este punto es importante destacar que, si bien esta clase de proyectos están ideados para participantes en edad estudiantil de forma generalista, también hay que admitir que pueden y deber ser perfectamente replicables y transferibles a otros ámbitos, así como a colectivos profesionales cuya actividad se establezca ajena a lo referente al aspecto biológico o liquénico a modo de buenas prácticas y aprendizaje ambiental.

**Adecuación y Transferencia:** las actividades planteadas con el objeto de conocer la funcionalidad y la situación de las comunidades liquénicas en el seno del medio ambiente urbano, poseen una ventaja relevante al generar un aprendizaje y conocimiento que puede ser replicado a distintos estamentos o niveles.

Además, hay que ser conscientes de que el estudio de campo vinculado a la biodiversidad de la dinámica liquénica genera proyectos ampliamente versátiles, replicables en otros estamentos sociales o rangos de edad teniendo en cuenta que se utilizan recursos fáciles de conseguir. Siendo las actividades planteadas fácilmente adaptables a otros entornos donde existan líquenes de manera natural.

## 12. Conclusiones

En este artículo se ha tenido en cuenta la importancia de la temática ambiental en el contexto del siglo XXI debido a la situación en la que nos encontramos como sociedad. En este sentido la inclusión de la tecnología parece haber marcado un punto de inflexión en la determinación y conocimiento del medio natural a la par que permite identificar las consecuencias negativas del comportamiento antrópico especialmente en entornos metropolitanos.

No obstante, de forma complementaria, el descubrimiento y aplicación de nuevos indicadores que permitan la obtención de información relevante para el seguimiento de potenciales fuentes de contaminación se antoja trascendental para el devenir de la calidad de vida de la ciudadanía. Una circunstancia mayormente relevante en aquellos lugares con menos recursos para poder establecer una red de detección precoz bien asentada.

Bajo esta circunstancia la presencia de organismos que puedan actuar como bioindicadores han ganado trascendencia en los últimos años debido a los buenos resultados que ha generado su estudio en multitud de enclaves.

Como ejemplo de éstos, se han consolidado los líquenes cuya relevancia en las labores de bioindicación han sido referenciadas hace décadas y su investigación asociada ha permitido entender estos organismos desde una perspectiva integradora y multidisciplinar. Puesto que existen investigaciones que apelan a sus cualidades que les sitúan muy próximos a poder ser considerados como biomonitores y bioacumuladores.

Sin embargo, es preciso señalar que además de las labores ambientales conocidas todavía que mucho por determinar en sus potenciales características para poder ser empleados como indicadores de otro tipo y especialmente de carácter socioeconómico. Puesto que su utilidad como indicadores de primera generación está ampliamente demostrada tras años de investigaciones con estos organismos como protagonistas. Aunque aún está por analizar si los líquenes pueden establecerse con la misma eficacia como indicadores de segunda y tercera generación en los contextos metropolitanos. Un hecho en el que no se ha profundizado previamente, pero que consagraría a los talos liquénicos como unos indicadores de una dimensión superior a su concepción actual.

Por último, cabe destacar una última vinculación de estos organismos con el medio natural y con el conjunto de la ciudadanía como son sus implicaciones como herramienta de educación ambiental. Una circunstancia que puede crear una nueva dimensión en el análisis prolongado de estos organismos en e contexto internacional.

### 13. Bibliografía

- Aragón, G., Martínez, I. y Burgaz, A. R. (2001). *Macrolíquenes de Castilla - La Mancha*. Instituto de Estudios Manchegos. CSIC. Ciudad Real.
- Ayestarán, I. y García, A. (2010). Filosofía de la naturaleza y de la sostenibilidad: un conocimiento renovado para el siglo XXI. *Eikasía. Revista de filosofía*. (35), 299-310.  
Recuperado de: <https://www.revistadefilosofia.org/35-17.pdf>
- Barreno, E. y Rico, V. (1984). Sobre la biología de los líquenes. I. Anatomía, morfología y estructuras vegetativas. *Anales de Biología*, (1), 161-195.  
Recuperado de: <https://revistas.um.es/analesbio/article/view/70291>
- Bobadilla, M., Espejel, M. I., Lara, F., Álvarez, S., Ávila, S. y Fermán, J. L. (2013). Esquema de evaluación para instrumentos de política ambiental. *Política y cultura*, (40), 99-122.  
Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-77422013000200006&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-77422013000200006&lng=es&tlng=es).
- Capó, M. (2007). *Principios de ecotoxicología*. Tébar. Madrid.
- Conti, M.E. y Cecchetti, G. (2001): Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment- a review. *Environmental Pollution Journal*, 114(3), 471-492.  
[https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(00\)00224-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00224-4)

- Crespo, A., Manrique, E., Barreno, E. y Serriñá, E. (1977). Valoración de la contaminación atmosférica del área urbana de Madrid mediante bioindicadores (líquenes epífitos). *Anales Instituto Botánico Cavanilles*, 34 (1), 71-94.
- Grindon, L. H. (1875). *Life: its nature, varieties and phenomena*. F. Pitman. Londres.
- Hawksworth, D. y Colwell, R. (1992). Microbial diversity 21: biodiversity amongst microorganisms and its relevance. *Biodiversity & Conservation*, 1, 221-226. <https://doi.org/10.1007/BF00693760>
- Hawksworth, D. y Rose, F. (1976). *Lichens as pollution monitors*. Edward Arnold. Londres.
- Hawksworth, D., Iturriaga, T., y Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de micología*, 22(2), 71-82.
- Recuperado de: <https://www.reviberooammicol.com/2005-22/071082.pdf>
- Koskimies, P. (1989). Birds as a tool in environmental monitoring. *Annales Zoologici Fennici*, (26), 153–66.
- Margulis, L. (1993). Origen of species: acquired genomes and individuality. *Biosystems*, 31(2-3), 121.125. [https://doi.org/10.1016/0303-2647\(93\)90039-F](https://doi.org/10.1016/0303-2647(93)90039-F)
- Nimis, P.L., Lazzarin A.G. y Gasparo, A. (1991). Lichens as bioindicators of air pollution by SO<sub>2</sub> in the Veneto Region (NE Italy). Edizioni Università di Trieste. Trieste.
- O'Hare, G. P. (1974). Lichens and bark acidification as indicators of air pollution in west central Scotland. *Journal of Biogeography*, 1 (2), 135-146. <https://doi.org/10.2307/3037960>
- Poelt, J. (1973). Appendix A. Classification. En V. Ahmadjian y M. E. Hale (eds.). *The lichens*. (599-632). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-044950-7.X5001-6>
- Polanco, C. (2006). Indicadores ambientales y modelos internacionales para toma de decisiones. *Gestión y ambiente*, 9(2), 27-41. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/1694/169420986007.pdf>
- Sotelo, J. A., Tolón, A., y Lastra, X. (2011). Indicadores por y para el desarrollo sostenible, un estudio de caso. *Estudios Geográficos*, 72(271), 611–654.
- Sotelo Pérez, I. (2020). *Disertación científica sobre sostenibilidad territorial y medio ambiente*. Observatorio medioambiental, nº 23, págs. 9-20
- Sotelo Pérez, I. y Sotelo Navalpotro, J.A. (2020). Aspectos generales de la Ordenación del Territorio y del Medio Ambiente. *M+A Revista electrónica del medioambiente*, vol. 21, nº1, pp. 102-121.
- Spribille, T., Tuovinen, V., Resl, P., Vanderpool, D., Wolinski, H., Aime, M.C., Schneider, K., Stabentheiner, E., Toome-Heller, M., Thor, G., Mayrhofer, H., Johannesson, H. y McCutcheon, J.P. (2016). Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens. *Science*, 353(6298), 488-92. <https://doi.org/10.1126/science.aaf8287>.
- Velazquez, A. C. y Salazar, V. (2019). Indicadores de calidad ambiental urbana: Una revisión. *Gestión y Ambiente*, 22(2), 303-312.