

RESEARCH / INVESTIGACIÓN

Líquenes como biosensores para la evaluación de contaminación atmosférica urbana y sub urbana en un valle de montaña tropical, Rionegro, Antioquia

Lichens as biosensors for the evaluation of urban and sub-urban air pollution in a tropical mountain valley, Rionegro, Antioquia

Mario Alberto Quijano Abril¹, Diana Marcela Ramírez Ospina², María Isabel Domínguez Rave³, James Londoño Valencia⁴

DOI. 10.21931/RB/2021.06.01.10

Resumen: Se realizó un estudio con el objetivo de evaluar la calidad del aire usando líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica. El estudio se realizó en el municipio de Rionegro, Colombia, a una altura de 2130 msnm, en 19 localidades agrupadas en 7 grandes zonas, que representan áreas urbanas con actividades generadoras de contaminación del aire y áreas sub-urbanas con pocas o ninguna fuente de contaminación. Para el área de estudio se calculó el índice de pureza atmosférica (IPA), el cual fue obtenido en función del número de especies de líquenes encontrados y de su frecuencia en la localidad monitoreada con esta información se realizó un mapa bidimensional de zonas de isocontaminación. La identificación taxonómica de los líquenes se realizó mediante comparación con especímenes de herbario y cortes histológicos. En total fueron encontrados 354 líquenes agrupados en 25 familias, 53 géneros y 126 especies. Las familias de líquenes mejor representadas con base al muestreo realizado fueron: *Parmeliaceae*, *Physciaceae* y *Graphidaceae*; asimismo, fueron encontrados 95 forofitos agrupados en 36 especies, 31 géneros y 21 familias. Se evidenció para las zonas con mayor contaminación, el hábito de crecimiento de los líquenes era costroso y folioso y para las de menor contaminación, era fruticoso. Los resultados del presente análisis de biosensores son congruentes con los obtenidos en la medición con equipos convencionales, por lo cual este método representa una fuente eficaz y económica para evaluar los niveles de contaminación en centros urbanos.

Palabras clave: Líquenes, Biosensores, Contaminación atmosférica, Índice de Pureza Atmosférica IPA.

Abstract: A study was carried out with the objective of evaluating air quality using lichens as bioindicators of atmospheric pollution. The study was carried out in the municipality of Rionegro, Colombia, at an altitude of 2,130 meters above sea level, in 19 localities grouped into 7 large areas, representing urban areas with activities that generate air pollution and sub-urban areas with few or no sources of air pollution. In the study area, the atmospheric purity index (IPA) was calculated, which was obtained based on the number of lichen species found and their frequency in the monitored location with this information, a two-dimensional map of ice-contamination zones were made. The taxonomic identification of the lichens was carried out by comparison with herbarium specimens and histological sections. In total, 354 lichens were found grouped into 25 families, 53 genera and 126 species. The best represented families of lichens based on the sampling carried out were: *Parmeliaceae*, *Physciaceae* and *Graphidaceae*; Likewise, 95 profits were found grouped into 36 species, 31 genera and 21 families. It was evidence that the areas with greater contamination, the growth habit of lichens was crusty and folious and for those with less contamination, it was fruticose. The results of the present analysis of biosensors are consistent with those obtained in the measurement with conventional equipment, therefore this method represents an efficient and economical source to evaluate the levels of contamination in urban centers.

Key words: Lichens, biosensors, air pollution, Index of Atmospheric Purity IAP.

Introducción

La contaminación del aire urbano genera problemas de salud pública, daño a ecosistemas naturales, así como, afectaciones al mobiliario urbano existente. Esta situación es uno de los mayores desafíos que enfrentan actualmente los grandes centros urbanos. Estudios realizados en Colombia han demostrado que en los últimos años la mayor contaminación del aire se presenta en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, teniendo en cuenta el crecimiento desenfrenado y desordenado dado en la última década¹. En el año 2016 el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), declara históricamente la alerta naranja en el área Metropolitana debido a la elevada acumulación de partículas contaminantes PM_{2.5} en la atmosfera, lo cual inicia una serie de estrategias para mitigar este fenómeno y deja en entre dicho la planificación y el control de emisiones contaminantes². El monitoreo

de la contaminación del aire cada vez es más necesario, sin embargo, implica un gran esfuerzo económico y logístico, el cual muchos municipios y áreas en vías de desarrollo no pueden costear.

Según el IDEAM³ en Colombia se contaba con 26 sistemas de vigilancia de la calidad del aire, los cuales sumaron 204 estaciones de monitoreo principalmente de contaminantes criterio. La cobertura espacial de estos sistemas de vigilancia abarcó 91 regiones entre ciudades y centros poblados. La evaluación de los contaminantes criterio se ha venido realizando mediante la implementación de métodos estandarizados que incluyen sensores manuales, automáticos y semiautomáticos, e incluso la mezcla de varios de estos.

Rionegro es uno de los municipios con mayor crecimiento en el país, donde diferentes aspectos como su calidad de vida

¹ Director del grupo de estudios florísticos, programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia.

² Ingeniera ambiental, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia.

³ Grupo de Investigación Unidad de Biotecnología, Universidad Católica de Oriente, Rionegro, Colombia.

⁴ Grupo de Limnología y Recursos hídricos, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica de Oriente.

y cercanía estratégica a Medellín han influido en una constante migración de residentes y empresas, las cuales han influido directamente en el deterioro de las condiciones del aire. A estos factores se suma la fundación en el año 1985 del Aeropuerto José María Córdova, el segundo más importante del país con una capacidad de 205.000 operaciones al año y que actualmente se está ampliando⁴. Estos fenómenos han llevado a la implementación de medidas que nunca antes se habían tomado por parte de la administración municipal, como la implementación del día sin carro y diferentes campañas que buscan disminuir el flujo vehicular. A pesar de esta problemática el municipio no cuenta con un sistema de alerta y monitoreo que permita un adecuado y constante control de la calidad del aire.

El cambio climático y la contaminación atmosférica son las principales amenazas para el mantenimiento de la salud ambiental y de las zonas ecológicas estratégicas, es por esto que se hace necesario una forma eficaz y de bajo costo que mida los efectos de esas amenazas. Los líquenes constituyen un sensor natural o bioindicador que puede ser utilizado en la vigilancia de la salud ambiental a largo plazo como la respuesta a la contaminación atmosférica^{5,6}.

La estimación de la calidad del aire local a partir de concentraciones elementales en líquenes o musgos que crecen de forma natural in situ es una técnica clásica^{7,8} con amplio uso actual para completar el costoso monitoreo de instrumentos⁹. Un indicador es un medio del que dispone el hombre para observar con sus sentidos en un tiempo breve un fenómeno que escapa a su percepción normal¹⁰. Una primera aproximación a la idea de lo que es un bioindicador puede encontrarse en la observación del comportamiento de algunas plantas y animales ante ciertos cambios atmosféricos¹¹.

Entre los más comunes bioindicadores reportados mundialmente ya sea por su sensibilidad a los contaminantes o por su resistencia a la acumulación de los mismos se encuentran los líquenes. Los líquenes son una asociación simbiótica entre un hongo y uno o más organismos autótrofos fotosintéticos, que puede ser un alga verde o una cianobacteria¹². Estos organismos se conocen por su sensibilidad a la contaminación del aire y especialmente por la estrecha relación entre número, abundancia y diversidad de especies con respecto a la presencia de diferentes contaminantes atmosféricos¹³. Estudios más detallados como los de Amman *et al.*¹⁴, muestran que los líquenes pueden ser utilizados como biomonitores de contaminación si se dispone de adecuada información sobre diferentes sustancias transportadas en el aire durante periodos de tiempo constantes, manteniendo esa idea, Alzate¹⁵ sostiene que la implementación de líquenes como biosensores, se convierte en una estrategia asequible y puede responder diferentes preguntas sobre la calidad del aire. Desde 1970 LeBlanc y De Sloover¹⁶ propusieron una metodología para el diagnóstico de la calidad del aire usando líquenes como bioindicadores y calculando un índice llamado Índice de Pureza Atmosférica (IPA), el cual es un número relacionado directamente con la riqueza de la vegetación, entonces, la vegetación de epifitas está relacionada con la calidad del aire; indicador que ha sido ampliamente utilizado en otros estudios como los propuestos por Udeni *et al.*¹⁷, Agnan *et al.*¹⁸, Troy *et al.*¹⁹ y Lijteroff *et al.*²⁰.

En Colombia, diferentes estudios realizados con bioindicadores se centran en la calidad del agua con especies indicadoras de macro-invertebrados y peces²¹, sin embargo, también se registran estudios con líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en algunos departamentos del país como Boyacá, Antioquia y Cundinamarca^{22,23,24}. Para el departamento de Antioquia los trabajos con líquenes se registran solo para valle de Aburra y su área Metropolitana^{22,25}. En el

municipio de Rionegro actualmente no se conoce ningún trabajo publicado al respecto que pueda servir como herramienta para las corporaciones ambientales regionales. Quizá los únicos acercamientos para medir la calidad del aire se han basado en monitoreos de las emisiones generadas por fuentes fijas.

En este trabajo se busca delimitar zonas de isocontaminación en el municipio de Rionegro. Para esto se utilizaron variables como la abundancia y distribución de biosensores líquenicos. Asimismo, se propone el primer listado ilustrado de la liquenoflora presente en las zonas urbanas y rurales del área de estudio.

Materiales y métodos

Área de estudio

Rionegro se encuentra ubicado en la cordillera central de los andes colombianos, a una altura de 2130m sobre el nivel del mar y dentro del valle llamado San Nicolás. Rionegro tiene una extensión de aproximadamente 200 km², un clima frío con una precipitación promedio anual de 2160 mm y una temperatura media anual de 17°C²⁶. Fueron seleccionadas diferentes zonas del municipio de Rionegro teniendo en cuenta una presencia representativa de actividad industrial, así como alto tránsito vehicular; adicionalmente, se escogió una zona donde la presencia de estas actividades fuera escasa para utilizarla como área de referencia. Para dicho propósito, se tomaron muestras en un área de reserva forestal ubicada en la misma zona de vida del municipio Rionegro y cercano a este, en el municipio de El Carmen de Viboral (Figura 1).

Selección de los forófitos para el monitoreo

Se realizó una inspección previa en las zonas seleccionadas con el fin de determinar los niveles de cobertura vegetal y seleccionar las especies de forófitos (sustratos para las comunidades de líquenes). Para el muestreo se siguieron las propuestas realizadas por García y Rubiano²⁷, quienes sugieren incluir individuos adultos y sanos, con un mínimo de 50cm de perímetro. Se excluyeron del análisis los árboles inclinados, en estado fitosanitario deficiente, pintados o de corteza lisa. Se seleccionaron 5 especies de forófitos por localidad, para un total de 95 árboles muestreados.

Muestreo de los líquenes

Para el muestreo de líquenes se utilizó la metodología propuesta por Amman *et al.*¹⁴, con las modificaciones realizadas por Nimis *et al.*²⁸, quienes sugieren la utilización de una red de muestreo de 30 x 50 cm, compuesta por 10 cuadrantes de 10 x 15 cm cada uno. Dicha red se situó sobre la zona del tronco con mayor densidad líquénica, a una altura no inferior a 120 cm del suelo y posteriormente se registró la frecuencia de cada especie en la red de muestreo, mínimo 1 y máximo 10 cuadrantes.

Delimitación de zonas de isocontaminación

Para el cálculo del índice de pureza atmosférica (IPA) de cada estación se sumaron las frecuencias de todas las especies presentes en la red de muestreo y se dividió entre el número de forófitos muestreados en dicha estación según la ecuación 1, propuesta por LeBlanc y De Sloover¹⁶ y modificada por Rubiano y Chaparro²³, de acuerdo a la ecuación 1.

$$IPA_j = \sum_{i=1:n} \frac{Q_i * f_i * C_i}{n} \quad (1)$$

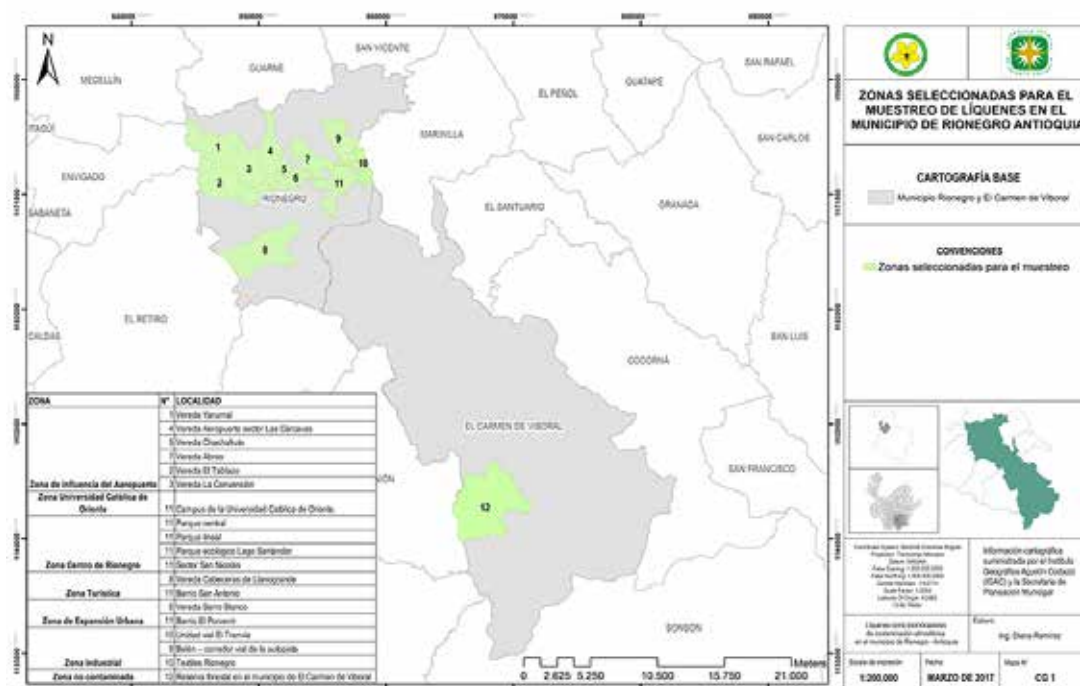


Figura 1. Zonas seleccionadas para muestreo de líquenes en los municipios Rionegro y El Carmen de Viboral

Donde IPA es el Índice de Pureza Atmosférica para cada zona j , n es el número de unidades muestreadas para cada zona j , Q es el factor medio de resistencia en función de la riqueza del género o especie i encontrada (grado de sensibilidad), f es la frecuencia de cada especie i (número de forofitos de la especie i en la zona j) y C en la cobertura relativa del líquen de la especie i en la zona j .

Posteriormente se realizó la marcación de polígonos sobre el mapa del municipio, donde se agruparon las localidades con similitud en la influencia de contaminantes, teniendo como referencia las zonas de muestreo. La tabla 1 presenta los rangos IPA y su correspondiente clasificación de la calidad del aire. Para la identificación de las zonas de isocontaminación, se definieron valores del IPA desde 36 a 79,4 de acuerdo a lo propuesto por Fernández *et al.*²⁹. La representación cartográfica se realizó en el programa ArcGis versión 10.4, donde se ubicaron las localidades de muestreo georreferenciadas, a partir de las cuales se generaron los polígonos de áreas de isocontaminación mediante la interpolación IDW (Inverse Distance Weighting por su sigla en inglés), según la ecuación 2.

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(S_i) \quad (2)$$

En el cual $Z(S_0)$ es el valor a predecir, N es el número de muestras alrededor del punto a predecir, λ_i son los pesos asignados a cada punto vecino y $Z(S_i)$ son los valores medidos.

Clase líquénica	Zona	Intervalo del IPA	Calidad del aire
A (Supervivencia líquénica)	I	36 <= IPA < 42	Muy baja
		42 <= IPA < 48	Baja
B (Transición de comunidades)	II	48 <= IPA < 54	Baja – Moderada
		54 <= IPA < 60	Moderada
C (Flora seminatural)	III	60 <= IPA < 66	Moderada – Alta
		66 <= IPA < 72	Alta
D (Flora natural)	IV	72 <= IPA	Muy alta

Tabla 1. Clases líquénicas, calidad del aire y equivalencia con diferentes intervalos del IPA. Adaptado de Fernández *et al.*²⁹.

Identificación taxonómica

La identificación taxonómica se realizó utilizando la metodología propuesta por Goward³⁰, donde expone los siguientes pasos para la identificación del líquen: a) comparación con especímenes de herbario previamente identificados y b) cortes histológicos a mano alzada o micrótopo de congelación para conocer la forma y tamaño de las esporas, grosor del himenio en los apotecios, espesor de los estratos talinos (corteza superior e inferior, estrato del fitobionte, estrato medular).

Resultados y discusión

Se realizó el monitoreo en 19 localidades distribuidas en el municipio de Rionegro y una de ellas en el municipio de El Carmen de Viboral y como se mencionó anteriormente fue utilizada como zona de referencia, debido a la baja contaminación del área en la reserva forestal. Las especies de forofitos sobre los cuales se trabajó se pueden observar en la tabla 2.

Composición florística

Se registraron y evaluaron un total de 95 forofitos agrupados en 36 especies, 31 géneros y 21 familias. Las familias mejor representadas con base en el muestreo realizado fueron: *Euphorbiaceae*, *Bignoniaceae* y *Arecaceae*. Entre los géneros más abundantes se destacan *Croton* con 12 individuos, *Acacia* con 9 individuos y *Archontophoenix* con 8 individuos. La especie más

Zona	Localidad	Forofito	
Zona de influencia Aeropuerto	Vereda Yatumal	EUPHORBIACEAE <i>Croton magdalenensis</i> (3 forofitos muestreados)	
		URTICACEAE <i>Cecropia teleitida</i>	
		HYPERICACEAE <i>Vismia baccifera</i>	
	Vereda Aeropuerto - Zona Cárcavas	FABACEAE <i>Acacia melanoxylon</i> (2 forofitos muestreados)	
		ERICACEAE <i>Cavendishia pubescens</i> (2 forofitos muestreados)	
		EUPHORBIACEAE <i>Croton magdalenensis</i>	
Vereda Chachafrito	EUPHORBIACEAE <i>Croton magdalenensis</i> (2 forofitos muestreados)		
	LAURACEAE <i>Persea americana</i>		
	FABACEAE <i>Erythrina edulis</i>		
	MYRTACEAE <i>Myrcia popayanensis</i>		
Vereda Abreo	ACANTHACEAE <i>Trichanthera gigantea</i> (2 forofitos muestreados)		
	MYRTACEAE <i>Eucalyptus globulus</i>		
	FABACEAE <i>Acacia melanoxylon</i> y <i>Acacia decurrens</i>		
Vereda El Tablazo	BIGNONIACEAE <i>Tecoma sp.</i>		
	FAGACEAE <i>Quercus humboldtii</i>		
	ARECACEAE <i>Archontophoenix cunninghamiana</i> (2 forofitos muestreados)		
	EUPHORBIACEAE <i>Croton magdalenensis</i>		
Vereda La Convención	CLETHRACEAE <i>Clethra fagifolia</i> (5 forofitos muestreados)		
	EUPHORBIACEAE <i>Croton magdalenensis</i> (2 forofitos muestreados)		
	FABACEAE <i>Acacia decurrens</i>		
	ARECACEAE <i>Archontophoenix cunninghamiana</i> (2 forofitos muestreados)		
Zona Universidad Católica de Oriente	Campus de la Universidad Católica de Oriente	EUPHORBIACEAE <i>Croton magdalenensis</i> (2 forofitos muestreados)	
		FABACEAE <i>Acacia decurrens</i>	
		ARECACEAE <i>Archontophoenix cunninghamiana</i> (2 forofitos muestreados)	
	Zona Centro de Rionegro	Parque central	MAGNOLIACEAE <i>Magnolia grandiflora</i>
			FABACEAE <i>Acacia decurrens</i> y <i>Erythrina edulis</i>
ARECACEAE <i>Archontophoenix cunninghamiana</i> (2 forofitos muestreados)			
Parque lineal		OLEACEAE <i>Fraxinus chinensis</i> (3 forofitos muestreados)	
Parque ecológico Lago Santander	Parque ecológico Lago Santander	FABACEAE <i>Erythrina edulis</i> y <i>Acacia melanoxylon</i>	
		PODOCARPACEAE <i>Retrophyllum rospigliosii</i>	
	Sector San Nicolás	ARECACEAE <i>Corypha umbraculifera</i> (2 forofitos muestreados) y <i>Archontophoenix cunninghamiana</i>	
		FABACEAE <i>Erythrina edulis</i>	
Zona turística	Vereda Cabeceras de Llanogrande	MYRTACEAE <i>Eugenia biflora</i> y <i>Myrcia popayanensis</i>	
		LYTHRACEAE <i>Lafoesia acuminata</i> (2 forofitos muestreados)	
		FABACEAE <i>Ormosia sp.</i>	
	Barrio San Antonio	JUGLANDACEAE <i>Juglans neotropica</i>	
		FABACEAE <i>Acacia decurrens</i> y <i>Erythrina edulis</i>	
		FABACEAE <i>Albizia carbonaria</i> (2 forofitos muestreados)	
Zona de expansión urbana	Barrio El Porvenir	MYRTACEAE <i>Eugenia myrtifolia</i>	
		EUPHORBIACEAE <i>Croton magdalenensis</i>	
		FABACEAE <i>Tephrosia sp.</i>	
	Vereda Barro Blanco	BIGNONIACEAE <i>Spathodea campanulata</i> y <i>Tabebuia chrysantha</i>	
		BIGNONIACEAE <i>Spathodea campanulata</i> (2 forofitos muestreados)	
		MYRTACEAE <i>Eugenia biflora</i>	
Zona industrial	Unidad vial El Tranvía	BIGNONIACEAE <i>Tabebuia chrysantha</i>	
		BIGNONIACEAE <i>Tabebuia chrysantha</i> (2 forofitos muestreados)	
		MYRTACEAE <i>Eugenia biflora</i>	
	Belén-corredor vial de la autopista	BIGNONIACEAE <i>Spathodea campanulata</i>	
		MELIACEAE <i>Cedrela montana</i>	
		LYTHRACEAE <i>Lafoesia acuminata</i> (2 forofitos muestreados)	
Sector Textiles Rionegro	Sector Textiles Rionegro	MALVACEAE <i>Dombeya burgessiae</i>	
		BIGNONIACEAE <i>Spathodea campanulata</i>	
	Reserva forestal en el municipio de El Carmen de Viboral	ASTERACEAE <i>Baccharis laifolia</i> (2 forofitos muestreados)	
		BETULACEAE <i>Alnus acuminata</i> (3 forofitos muestreados)	

Tabla 2. Especies de forofitos seleccionados para el muestreo de líquenes.

representativa en las estaciones de monitoreo fue *Croton magdalenensis* Müll. Arg presentándose en 8 de las 19 localidades, seguido por *Archontophoenix cunninghamiana* H. Wendl. & Drude y *Erythrina edulis* Triana ex Micheli presentes en 5 de las 19 localidades cada una. El hábito de crecimiento de las especies encontradas corresponde en su totalidad a arbóreo.

Composición líquénica

Se registraron un total de 354 individuos agrupados en

25 familias, 53 géneros y 126 especies. Las familias mejor representadas con base al muestreo realizado fueron: *Parmeliaceae*, *Physciaceae* y *Graphidaceae* (Figura 2). Entre los géneros más abundantes se destacan *Parmotrema* con 13 especies, *Usnea* con 11 y *Graphis* con 6 especies (Figura 3). Respecto a los hábitos de crecimiento, se encontró que los más abundantes eran folioso con 46 especies y crustáceo con 41, seguido de fruticuloso con 19 (Figura 4).

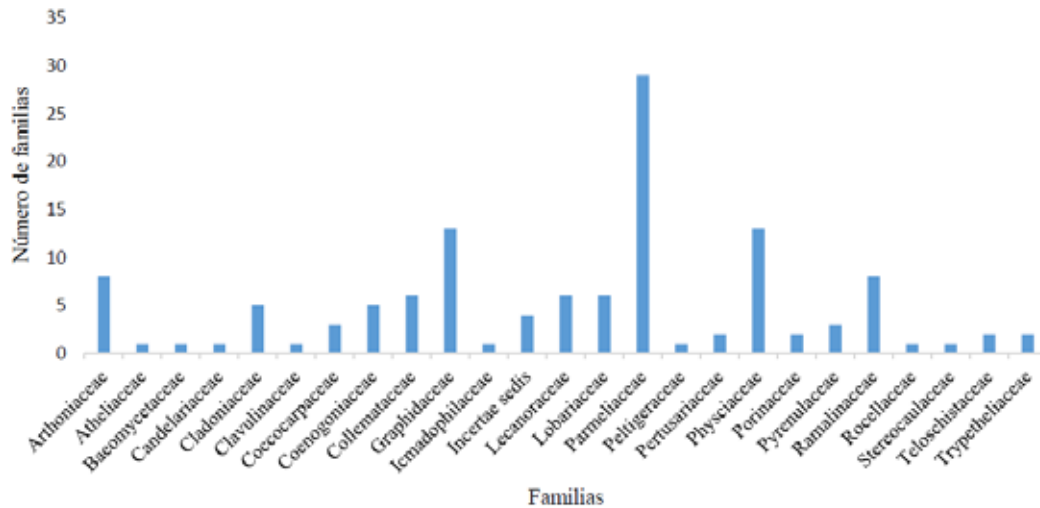


Figura 2. Composición líquénica por familias.

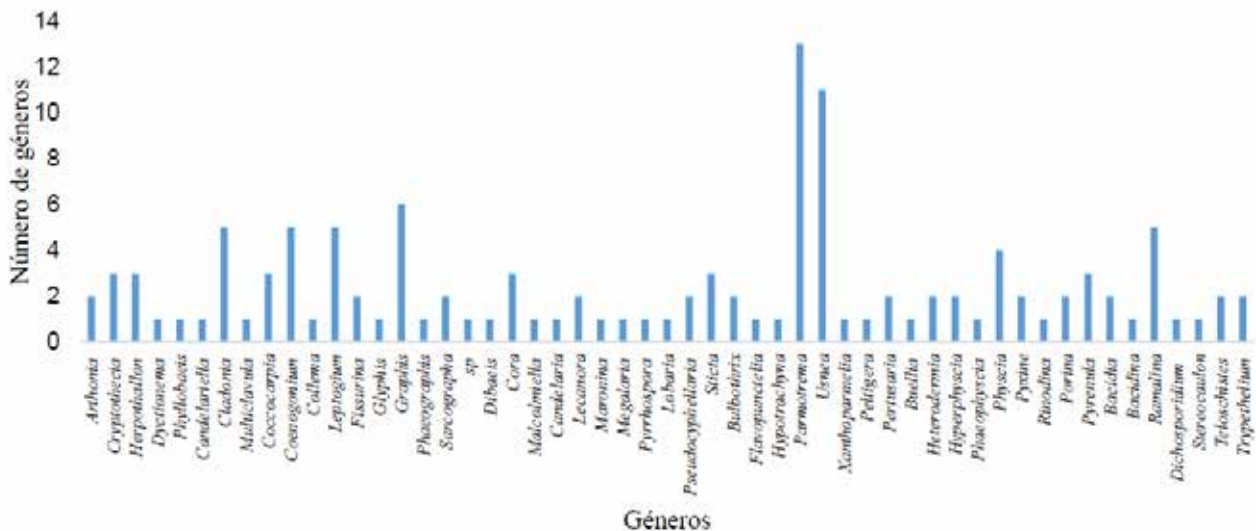


Figura 3. Composición líquénica por géneros.

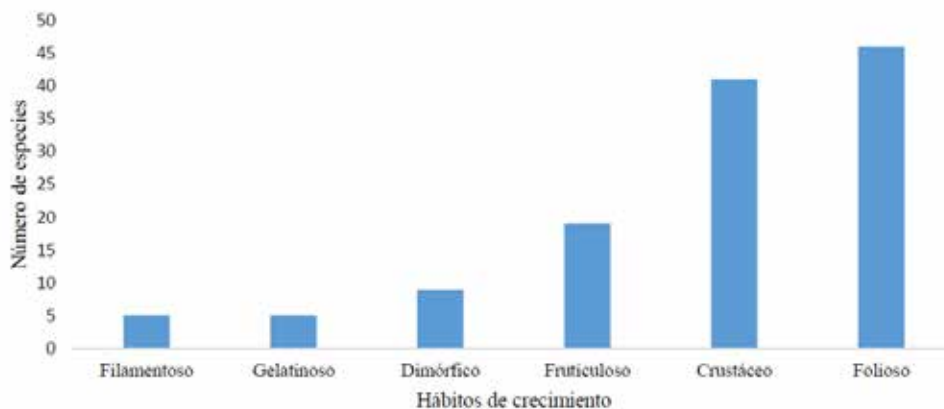


Figura 4. Composición líquénica por hábitos de crecimiento.

Zonas de isocontaminación

De acuerdo a las características de los puntos de toma de muestra, fueron definidas 7 zonas de isocontaminación que son presentadas en la tabla 3, en cada una de las zonas definidas se observan las localidades con su respectivo intervalo del IPA y clasificación de la calidad del aire.

La autoridad ambiental en la región es la Corporación Autónoma Regional de la Cuencas de los ríos Negro y Nare – CORNARE, como parte de su misión esta velar por la protección de los recursos naturales en su jurisdicción y en ese sentido, realizan periódicamente el monitoreo de la calidad del aire en la región; una de las estaciones con información de calidad del aire obtenida con equipos convencionales y que coincide con uno de los sitios utilizados en este estudio, está ubicada en la Universidad Católica de Oriente. Los resultados encontrados se muestran en la figura 5, según Cornare^{31,32,33} arrojan que esta estación y sus alrededores cuentan con una buena calidad del aire; las concentraciones de contaminantes que se han medido continuamente los últimos años como PM₁₀ y PM_{2,5}, así también otros esporádicos como CO, O₃, SO₂ y NO₂, han presentado también concentraciones por debajo de los límites establecidos en la norma colombiana de calidad del aire, resolución 2254 de 2017³⁴ y el equivalente Índice de Calidad

del Aire – ICA, ha presentado una calidad del aire en categoría "buena". Según Cornare³¹ la Universidad Católica de Oriente se encuentra ubicada en área urbana con presencia de edificaciones, los resultados arrojados por el IPA en este estudio y el ICA, calculado por la autoridad ambiental, fueron similares en cuanto a la calidad del aire evaluada por dos métodos diferentes.

Con base en la información obtenida en el estudio a través de la cuantificación del IPA, el cual ofrece un valor numérico del nivel de contaminación atmosférica en función del número de especies de líquenes encontrados y de su frecuencia en el área muestreada, se realizó el mapa bidimensional de zonas de isocontaminación. Este mapa incluyó cada una de las localidades monitoreadas y sus respectivos valores del IPA (Figura 6).

La mayor parte de las localidades muestreadas se caracterizaron por presentar líquenes con formas de crecimiento folioso y costroso como el género *Parmotrema* (común en zonas urbanas donde la contaminación por chimeneas es mayor), las cuales pueden soportar concentraciones más altas de contaminantes en la atmósfera^{29,35}. Asimismo, con la disminución en el flujo vehicular y la actividad industrial en algunas de las localidades, el índice de pureza atmosférica fue mayor,

Intervalo IPA	Calidad del Aire	Localidades evaluadas					
36 ≤ IPA < 42	Muy baja	Cárcavas	Parque lineal	Parque central	Belén	Llanogrande	San Antonio
42 ≤ IPA < 48	Baja	San Nicolás	-	-	-	-	-
48 ≤ IPA < 54	Baja/Moderada	Vereda Abreo	Barrio El Porvenir	Vereda Barro Blanco	Textiles Rionegro	-	-
54 ≤ IPA < 60	Moderada	Vereda La Convención	-	-	-	-	-
60 ≤ IPA < 66	Moderada/Alta	Sajonia-Yarumal	Parque ecológico Lago Santander	Vereda El Tablazo	Vereda Chachafrito	-	-
66 ≤ IPA < 72	Alta	UCO	-	-	-	-	-
72 ≤ IPA	Muy Alta	Reserva Forestal	-	-	-	-	-

Tabla 3. Intervalos de isocontaminación con respecto a la calidad del aire.

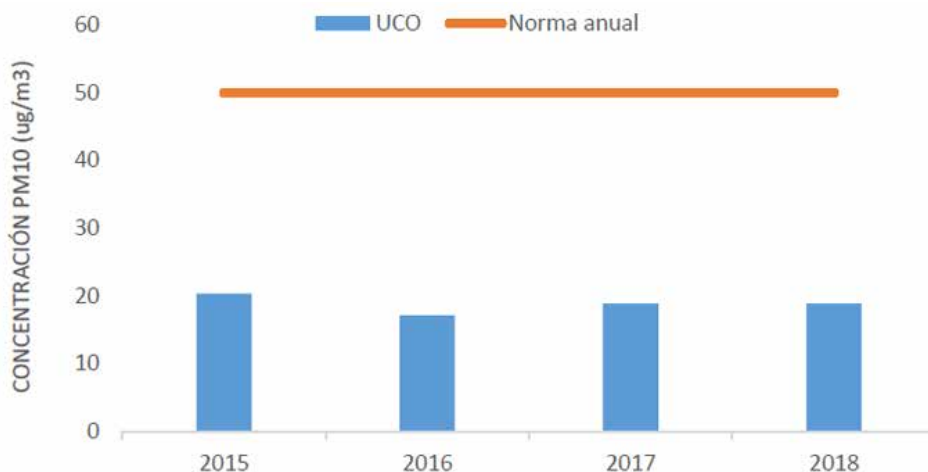


Figura 5. Concentración media anual de PM10 en la estación UCO medida por la autoridad ambiental Cornare. Adaptado de Cornare³³.

encontrándose individuos con hábitos de crecimiento fruticoso como los géneros *Usnea* y *Ramalina*, los cuales requieren niveles más bajos de contaminación para poder desarrollarse correctamente³⁵.

En las localidades con mayor contaminación, las poblaciones de líquenes mostraban daños morfológicos evidentes como cambio en la coloración, disminución de la cobertura, así como abundancia y diversidad (Figuras 7 y 8). Este cambio morfológico se debe principalmente a que los líquenes absorben y acumulan diversas sustancias presentes en el ambiente, la acumulación de estas sustancias y su imposibilidad de excretarlas retarda su crecimiento, dificulta su reproducción y puede provocarles en la mayoría de ocasiones la muerte^{22,36}.

Las zonas monitoreadas donde la calidad de aire oscila entre muy baja a baja - moderada, se caracterizaron por presentar una alta influencia de industrias y un denso tránsito vehicular, así como actividades mineras en algunas de ellas, además de esto se observó poca cobertura boscosa y grandes proyectos urbanísticos, a medida que la calidad del aire aumentaba se podía apreciar la disminución en cuanto a la influencia de industrias, además del aumento en la cobertura boscosa. La mayoría de las zonas monitoreadas presentaron calidad del aire de muy baja a baja - moderada, sin embargo, se debe tener en cuenta que son sitios donde la dispersión de los contaminantes se dificulta debido a las edificaciones.

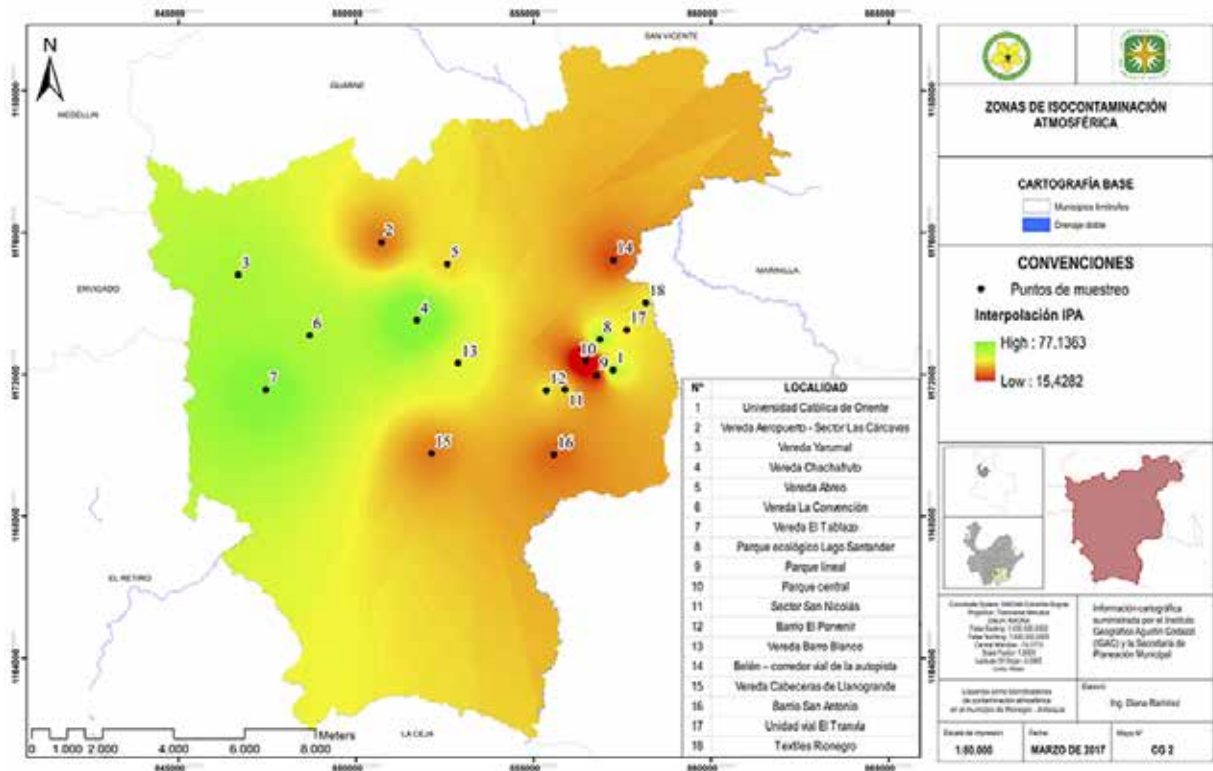


Figura 6. Mapa de isocontaminación de las zonas muestreadas (IPA).



Figura 7. Cambios en la coloración de líquenes debidos a efectos contaminantes presentes en la atmósfera.



Figure 8. Disminución de la cobertura, abundancia y diversidad líquénica. A. Forófito muestreado en la reserva forestal en el municipio de El Carmen de Viboral. B. Forófito muestreado en la localidad vereda Abreo.

Conclusiones

La contaminación de la atmósfera afecta a muchas comunidades, especialmente a las que viven en lugares industrializados y con un denso tránsito vehicular, es por esta razón que es de vital importancia realizar estudios de análisis de calidad del aire, con el fin que las personas con mayor vulnerabilidad no se vean afectadas y realizar vigilancia y control a las emisiones de contaminantes arrojados a la atmósfera para que se puedan reducir las inmisiones de los mismos.

Es de vital importancia generar alternativas para el estudio de la calidad del aire en una región que sean de fácil acceso y bajo costo. Con base en los resultados obtenidos en el presente estudio es factible considerar a los líquenes como una excelente herramienta para tal propósito, pues se comprobó su sensibilidad al efecto negativo de contaminantes presentes en la atmósfera en cuanto a su abundancia, diversidad y frecuencia, además de que pueden ser encontrados en gran diversidad de ambientes lo que facilita su uso.

El uso de líquenes permite evaluar constantemente la calidad del aire en una localidad, diferente a un equipo de medición que lo hace de forma periódica; es por esto que una de las mayores potencialidades de estos organismos es que actúan como monitores continuos en el tiempo.

Con la metodología aplicada se lograron delimitar 7 zonas de isocontaminación en las que se dividieron las 19 localidades monitoreadas. Las zonas con menor calidad del aire correspondieron a las localidades con mayor influencia vehicular e industrial, las mismas fueron las de menor abundancia, diversidad y frecuencia líquénica. Asimismo, en las localidades que presentaron mayores índices de contaminación, se evidenció que el hábito de crecimiento de las especies de líquenes era costroso y folioso; y cuando el índice de pureza atmosférica aumentó se encontraron especies con hábito de crecimiento fruticoso.

Mediante el análisis de composición líquénica se pudieron definir áreas en las que debe priorizar la aplicación de estrategias de control para el mejoramiento de la calidad del aire con la reducción de emisiones por fuentes fijas y móviles que son las principales causantes de su deterioro.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Católica de Oriente por la financiación al desarrollo de este trabajo; a la Doctora Margarita María Jaramillo Ciro, por su apoyo en el desarrollo metodológico del trabajo y la identificación líquénica.

Referencias bibliográficas

- AMVA (2019). Actualización Inventario de emisiones atmosféricas del valle de Aburrá - año 2018. Informe técnico. Contrato de ciencia y tecnología No. 1179 de 2018.
- Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), 2016. Geoportal. Disponible en: https://siata.gov.co/siata_nuevo/. Accessed in August/2018.
- IDEAM. Informe de la Calidad del Aire en Colombia 2017. Primera Edición, Bogotá, D.C., 2018.
- Aeronáutica Civil (2017). Se mantiene el crecimiento del transporte aéreo en Colombia. Obtenido en <http://www.aerocivil.gov.co/prensa/noticias/Pages/se-mantiene-el-crecimiento-del-transporte-aereo-en-colombia.aspx>.
- Giordani P, Bruniati G, Bacaro G, Nascimbene J. 2012. Functional traits of epiphytic lichens as potential indicators of environmental conditions in forest ecosystems. *Ecol Indic.* 18:413_420.
- Will-Wolf, S., Jovan, S., & Amacher, M. C. (2017). Lichen elemental content bioindicators for air quality in upper Midwest, USA: A model for large-scale monitoring. *Ecological Indicators*, 78, 253-263. doi:10.1016/j.ecolind.2017.03.017
- Ferry, B.W., Baddeley, M.S., Hawksworth, D.L., 1973. *Air Pollution and Lichens*. University of Toronto Press, Toronto, Ontario, CA.
- Martin, M.H., Coughtrey, P.J., 1982. *Biological Monitoring of Heavy Metal Pollution*. Applied Science Publishers, London, UK.
- Donovan, G.H., Jovan, S.E., Gatzolis, D., Burstyn, I., Michael, Y.L., Monleon, V.J., Amacher, M.C., 2016. Using an epiphytic moss to identify previously unknown sources of atmospheric cadmium pollution. *Sci. Total Environ.* 569, 84-93.
- Honsberger, P. (1988). *Ecotoxicología*. Escuela Politécnica Federal de Lausanne. Suiza.
- Kohler, P. (1981). *Entender el clima*. Paris: Hachette.
- Chaparro, M. y Aguirre, J. (2002). *Hongos liquenizados*. Facultad de Ciencias. Departamento de Biología. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

13. Matthey, W., Della, E. y Wannenmacher, C. (1984). Manual práctico de ecología. Lausanne: Payot.
14. Amman, K., Herzig, R., Libendoerfer, L. y Urech, M. (1989). Multivariate correlation of deposition data of 8 different air pollutants to Swiss lichen IPA method in Biel and the Swiss plain. En: Boehm, G. y Leuschner, R. M. (Eds.). *Advances in Aerobiology: proceedings of the 3rd International Conference on Aerobiology*, August 6-9, 1986, Basel, Suiza: 401-406. Birkhauser Verlag, Basel, Boston.
15. Alzate G., F, Quijano A., M.A, Alvarez, A., & Fonnegra, R. (2015). Atmospheric pollen and spore content in the urban area of the city of Medellín, Colombia. *Hoehnea*, 42(1), 9-19. <https://doi.org/10.1590/2236-8906-52/2013>
16. LeBlanc, S.C.F., De Sloover, J., 1970. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Can. J. Bot.* 48 (8), 1485-1496. <https://doi.org/10.1139/b70-224>.
17. Udeni Jayalal, Soon Ok Oh, Jung Shin Park, Joo Han Sung, Sun Hee Kim & Jae-Seoun Hur (2016) Evaluation of air quality using lichens in three different types of forest in Korea, *Forest Science and Technology*, 12:1, 1-8, DOI: 10.1080/21580103.2014.1003983
18. Y. Agnan, A. Probst, N. Séjalon-Delmas. Evaluation of lichen species resistance to atmospheric metal pollution by coupling diversity and bioaccumulation approaches: A new bioindication scale for French forested areas. *Ecological Indicators*, Volume 72, 2017, Pages 99-110, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.006>.
19. Richard Troy McMullin, Darien Ure, Matthew Smith, Harold Clapp, Yolanda F. Wiersma, Ten years of monitoring air quality and ecological integrity using field-identifiable lichens at Kejimikujik National Park and National Historic Site in Nova Scotia, Canada, *Ecological Indicators*, Volume 81, 2017, Pages 214-221, ISSN 1470-160X, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.069>.
20. Lijteroff, Rubén, Lima, Luis, & Prieri, Betzabé. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(2), 111-120. Recuperado en 10 de septiembre de 2020, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000200006&lng=es&tlng=es.
21. Roldán G, Ramirez JJ. (2008) *Fundamentos de Limnología Neotropical*, 2a Edición. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
22. Jaramillo-Ciro, M. M. (2008). Estudio exploratorio de las posibles afectaciones de la comunidad líquénica asociadas a dos estaciones de alta y baja contaminación de la red de monitoreo de la calidad del aire del Valle de Aburrá. *Fragua*, 1, 87-105.
23. Rubiano, L. J. y Chaparro, M. (2006). Delimitación de áreas de isocontaminación atmosférica en el campus de la Universidad Nacional de Colombia mediante el análisis de bioindicadores (líquenes epífitos). *Universidad Nacional de Colombia*, sede Bogotá.
24. Simijaca, D. F., Vargas, D. L. y Morales, M. E. (2014). Uso de organismos vegetales no vasculares como indicadores de contaminación atmosférica urbana (Tunja, Boyacá, Colombia). *Acta biológica colombiana*, 19, 221-232.
25. Correa-Ochoa, M. A., Vélez-Monsalve, L. C., Saldarriaga-Molina, J. C., & Jaramillo-Ciro, M. M. (2020). Evaluation of the Index of Atmospheric Purity in an American tropical valley through the sampling of corticolous lichens in different phorophyte species. *Ecological Indicators*, 115, 106355. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106355
26. IDEAM. (2018). Atlas Climatológico de Colombia. Obtenido en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
27. García, L. y Rubiano, L. (1984). Comunidades de líquenes como indicadores de niveles de calidad de aire en Colombia. *Cont. Amb. Volumen 8, Capítulo 13, Medellín-Colombia*.
28. Nimis, P. L., Ciccarelli, A., Lazzarin, G., Bargagli, R., Benedet, A., Castello, M., Gasparo, D., Lausi, D., Olivieri, S. y Tretiach, M. (1989). I licheni come bioindicatori di inquinamento atmosferico nell'area di schio. *Thiene: Breganze (VI). Boll. Mus. Civ. St. Nat. Verona* 16: 1-154.
29. Fernandez, A. B., Terrón, A. y Barreno, E. (2006). Bioindicadores de la calidad del aire en La Robla (León, noroeste de España) diez años después. *Lazaroa*, 27, 29-41.
30. Goward, T., Mccune, B., Meidinger, D. 1994. The lichens of British Columbia. *British Columbia, Canada*. Obtenido en <http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/docs/Srs/Srs08.htm>
31. Cornare (2017). Campaña de monitoreo de la calidad del aire, Contrato No. 340 – 2016. Consultado en: <http://www.cornare.gov.co/sistema-de-informacion-ambiental-regional/calidad-del-aire/>.
32. Cornare (2018). Informe final de calidad del aire. convenio interadministrativo número 320 de 2017. Consultado en: <http://www.cornare.gov.co/sistema-de-informacion-ambiental-regional/calidad-del-aire/>.
33. Cornare (2019) Informe final de calidad del aire de la campaña 2 de monitoreo del convenio interadministrativo Cornare-Universidad de Antioquia número 228- 2018. Consultado en: <http://www.cornare.gov.co/sistema-de-informacion-ambiental-regional/calidad-del-aire/>.
34. Ministerio de Ambiente, Ambiente y Desarrollo Territorial. Resolución 610 del 24 de marzo de 2010. Bogotá, 11p.
35. Richardson, D.H.S. 1988. Understanding the pollution sensitivity of lichens. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 96: 31-43.
36. Ederra, A. (1996). *Botánica ambiental aplicada*. 2ª edición. Pamplona: Ediciones EUNESA.

Received: 4 noviembre 2020

Accepted: 4 enero 2021



cedia

**CORPORACIÓN ECUATORIANA
PARA EL DESARROLLO DE LA
INVESTIGACIÓN Y LA ACADEMIA**



CEDIAec

www.cedia.edu.ec