



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN / RESEARCH ARTICLE

CALIDAD DEL AIRE DEL MUNICIPIO DE FACATATIVÁ
(CUNDINAMARCA, COLOMBIA) A PARTIR DEL
USO DE LÍQUENES COMO BIOINDICADORESAir Quality of the Municipality of Facatativá (Cundinamarca,
Colombia) from the Use of Lichens as Bioindicators

Yessica Paola CERÓN-PEDRAZA¹, Laura Ximena CLAVIJO-CASTELLANOS¹, Dionne Paola BALLESTEROS-PINTOR^{1*},
William Andrés CASTAÑEDA-CELEITA¹, Jaime AGUIRRE-CEBALLOS²

¹ Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Cundinamarca, Dg 18 No. 20-29 Fusagasugá, Colombia, yceron@ucundinamarca.edu.co; lxclavijo@ucundinamarca.edu.co; dpballesteros@ucundinamarca.edu.co; wacastaneda@ucundinamarca.edu.co

² Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Carrera 45 # 26-85 Bogotá D.C., Colombia, jaguirrec@unal.edu.co

* For correspondence

Recibido: 08 de junio de 2023. **Revisado:** 27 de diciembre de 2023. **Aceptado:** 08 de febrero de 2024

Editor asociado: Xavier Marquínez

Citation/ citar este artículo como: Cerón-Pedraza, Y. P., Clavijo-Castellanos, L. X., Ballesteros-Pintor, D. P., Castañeda-Celeita, W. A. y Aguirre-Ceballos, J. (2024). Calidad del aire del municipio de Facatativá (Cundinamarca, Colombia) a partir del uso de líquenes como bioindicadores. *Acta Biol Colomb.*, 29(2), 151-159. <https://doi.org/10.15446/abc.v29n2.108990>

RESUMEN

La contaminación atmosférica es un fenómeno registrado a nivel global, que afecta la salud humana y la de otros organismos, debido a la cantidad y a la peligrosidad de compuestos tóxicos que se liberan. Los líquenes son organismos fotosintéticos ampliamente utilizados como bioindicadores de la calidad del aire. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad del aire del municipio de Facatativá-Cundinamarca (Colombia) mediante el uso de líquenes. Se realizaron ocho salidas de campo en marzo, abril, octubre y noviembre de 2021 y 2022; se establecieron 25 puntos de muestreo distribuidos en siete veredas del municipio y en la zona urbana. Se registró la cobertura de cada líquen sobre los forófitos presentes en el camino. La diversidad de líquenes estuvo compuesta por 11 especies, las más frecuentes fueron *Parmotrema sp1*, *Physcia sp.* y *Candelaria concolor*. La diversidad y equitatividad fueron mayores en La Selva, Los Manzanos y La Tribuna, sitios con los menores niveles de contaminación y mejor calidad del aire. La zona urbana, representada por Mancilla y Prado Alto presentaron una calidad de aire muy mala probablemente debido a la cantidad de tráfico vehicular municipal, intermunicipal y el asociado a las industrias de alimentos y de combustibles. Se registró a *Parmotrema sp1*, *Usnea sp* y *H. leucomelos* como especies con menor sensibilidad a los contaminantes y a *R. celsi*, *P. austrosinense* y *F. flaventior* como especies con mayor sensibilidad.

Palabras clave: contaminación por fuentes móviles, dióxido de azufre, indicadores biológicos, índice de pureza atmosférica, índices de diversidad.

ABSTRACT

Air pollution is a global recorded phenomenon, which affects human health and other organisms as well, due to the amount and danger of toxic compounds that are released. Lichens are photosynthetic organisms widely used as bioindicators of air quality. The present research aimed to evaluate the air quality of the municipality of Facatativá-Cundinamarca, Colombia using lichens. Eight field trips were conducted in March, April, October, and November 2021 and 2022; 25 sampling points were established and distributed in seven villages of the municipality and the urban area. The coverage of each lichen on the phorophytes present on the road was recorded. The diversity of lichens is composed of 11 species, the most frequent were *Parmotrema sp1*, *Physcia sp.*, and *Candelaria*

concolor. Diversity and equity were greatest in La Selva, Los Manzanos, and La Tribuna, places with the lowest levels of pollution and better air quality. The urban area, Mancilla and Prado Alto presented a very bad air quality probably due to the amount of municipal and intermunicipal vehicles and traffic associated with petroleum and food industries. *Parmotrema* sp1, *Usnea* sp, and *H. leucomelos* were recorded as species with lower sensitivity to contaminants and *R. celastri*, *P. austrosinense* and *F. flaventior* as species with greater sensitivity.

Keywords: Pollution from mobile sources, sulphur dioxide, biological indicators, atmospheric purity index, diversity indices.

INTRODUCCIÓN

Las emisiones de contaminantes y sustancias tóxicas a la atmósfera, provocadas principalmente por el crecimiento poblacional y la industrialización, en las diferentes ciudades del país han generado cambios directos al entorno, alterando la fisiología, el comportamiento y la distribución de los organismos vivos, como también son responsables de algunas variaciones en los distintos factores abióticos. Existen organismos que por su peculiaridad en el modo de reacción ante fenómenos externos pueden ser usados para representar el grado de contaminación y son conocidos como bioindicadores. Estos organismos responden a las perturbaciones ambientales bien sea por alteraciones en sus funciones vitales o por acumulaciones de contaminantes, lo que proporciona una visión clara de las condiciones en las que se encuentra el medio (Romero, 2013). Dentro de los organismos vivos empleados como bioindicadores, los líquenes son los más idóneos para la evaluación de la contaminación atmosférica, debido a la susceptibilidad ante ciertos compuestos tóxicos presentes en el ambiente, tales como el dióxido de azufre (SO₂), ácido clorhídrico HCl, dióxido de carbono (CO₂), cuya presencia en el organismo fotosintético se manifiesta en alteraciones morfológicas y fisiológicas (Giordani, 2007), y a nivel de comunidad se reflejan en los cambios en la cantidad de especies y en su porcentaje de cobertura, situación que por lo general muestra un panorama del nivel de pureza del aire en el entorno donde se encuentran (Ochoa-Jiménez et al., 2015). Los líquenes foliosos suelen ser sensibles a los factores atmosféricos debido a que no poseen una relación de dependencia nutricional del sustrato, razón por la cual son más dependientes de la atmósfera (Canseco et al., 2006; Figueroa y Méndez, 2015). Un mecanismo para evaluar y cualificar la calidad de aire es el índice de pureza atmosférica (IPA), que corresponde a un índice biológico que considera la presencia, la cobertura, la abundancia y la distribución de las especies de líquenes en una misma área, donde la contaminación existente puede producir alteraciones en la estructura de las poblaciones líquénicas (Gonzales et al., 2016). En el municipio de Facatativá-Cundinamarca, no se han realizado evaluaciones o monitoreos de la calidad del aire mediante métodos fisicoquímicos (de alto costo) o usando bioindicadores, a pesar de que se presenta un alto tráfico vehicular (Bernal y Sandoval, 2017), así como emisiones atmosféricas de empresas como Bio D S.A., Yanbal, Alpina, Ecopetrol, Arrocera de la Sabana, Alimentos Concentrados Raza Ltda., Cootrapromasa, Alimentos Polar e Inagro, cuya actividad

libera contaminantes como dióxido de carbono, óxido de nitrógeno, óxidos de azufre y material particulado (Albornoz & Guerrero, 2019).

El propósito de esta investigación fue evaluar la calidad del aire del municipio de Facatativá-Cundinamarca, usando los líquenes como bioindicadores. Para ello se estableció la riqueza y composición de las comunidades de líquenes presentes en las zonas rural y urbana del municipio, se definieron los cambios en la estructura y posteriormente se determinó la calidad de aire mediante el IPA.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El municipio de Facatativá está ubicado al extremo occidental de la sabana de Bogotá, en el departamento de Cundinamarca; cuenta con un área urbana de 5,1 Km² y un área rural de 154,5 Km² conformada por catorce veredas (Corito, Cuatro Esquinas de Bermeo, El Corzo, La Selva, La Tribuna, Los Manzanos, Mancilla, Moyano, Paso Ancho, Prado, Pueblo Viejo, San Rafael, Tierra Grata y Tierra Morada) (Rubiano, 2010)

Toma de datos

se seleccionaron tres puntos de muestreo en cada una de las siete veredas escogidas (La Selva, La Tribuna, Los Manzanos, Mancilla, Prado, Pueblo Viejo y San Rafael) y cuatro puntos en el área urbana, sobre la Carrera 5, sobre la Carrera 1, en la Carrera 7 con Calle 5 y en la IEM Comercial Santa Rita. Las veredas y la zona urbana se entienden como estaciones de muestreo para un total de ocho estaciones. Los criterios de selección de los puntos fueron: carretera frecuentada por vehículos motorizados, presencia de árboles alrededor de la carretera y equidistancia de los puntos a lo largo de toda la carretera. Los datos se tomaron durante los meses lluviosos (marzo, abril, octubre y noviembre) de los años 2021 y 2022 puesto que en época lluviosa los líquenes se hacen más visibles por el aumento de su cobertura. En cada punto se realizaron transectos de 20 m lineales a lo largo del camino o carretera donde pasan los vehículos, en los que se registraron y fotografiaron las especies de líquenes presentes en las cortezas de los árboles. En la zona urbana los transectos fueron de 40 m lineales debido a la menor densidad de forófitos, y así poder registrar datos en aproximadamente la misma cantidad de árboles en todas las estaciones. Dentro de cada uno de los reconocimientos

se evaluó el cumplimiento de los criterios basados en la metodología de García (2004): Presencia de forófitos de las mismas especies (*Cupressus lusitanica* Mill., *Verbesina* sp. (Cav.) Benth. & Hook. f. ex A. Gray., *Acacia decurrens* Willd. Sp., *Acacia forrajera* (Lam.) de Wit, Taxon, *Eucaliptus* sp. Labill., *Oreopanax floribundum* (Schults), *Alnus acuminata* (L.) Gaertn., *Pittosporum undulatum* (Vent.), *Citharexylum subflavescens* S.F. Blake, *Croton* cf. *mutisianus* Humb., Bonpl. & Kunth, Nov. Gen. Sp. y *Vallea stipularis* Mutis ex L.fil.), se consideró un diámetro a la altura del pecho (DAP) mayor a 10 cm y menor a 100 cm y que todos los troncos fueran completamente erectos. Se registró la presencia de líquenes y su cobertura (como una medida de la abundancia) sobre cada uno de los forófitos escogidos en el transecto; para determinar las coberturas se empleó una cuadrícula de 50 x 20 cm, dividida en 40 cuadrantes. La cuadrícula se ubicó a una altura de 1 m del nivel del suelo por cada cara del forófito (norte, oriente, sur, occidente) para un conteo exacto del número de cuadrantes en los que se encontró cada especie o género de los líquenes, basados en las metodologías de “Manual Red CE de nivel II” (Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos SSF, 2000), Canseco et al. (2006) y Figueredo (2020). Adicionalmente, se determinó la frecuencia líquénica en cada estación, definida como el número de árboles en los que se registró cada especie.

Tratamiento de los datos

A los datos de coberturas, que en este caso se toman como medida de la abundancia, se les aplicó la prueba de normalidad mediante el estadístico Shapiro-Wilk y se valoró la existencia de diferencias significativas entre las diferentes estaciones, mediante la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis; por otro lado se calcularon los índices de diversidad: riqueza, diversidad de Simpson, Shannon Wiener-Wiener (H'), dominancia y equitatividad; para comparar los cambios en diversidad entre veredas, se determinó el Coeficiente de similitud de Jacard y se realizó un análisis de clúster, empleado como herramienta de cálculo el paquete estadístico PAST (Hammer et al., 2006).

Con los datos de coberturas y frecuencias se calculó el IPA en cada punto de cada estación de muestreo, según la metodología reformulada por Steubing y Fangmeier (1992) que relaciona la presencia o ausencia de especies sensibles o tolerantes a contaminantes atmosféricos, para expresar un nivel de calidad del aire y zonificar el área a partir de los diferentes niveles de contaminación. Esta metodología fue utilizada debido a que tiene en cuenta el grado de sensibilidad (Q_i) de las especies encontradas (Canseco et al., 2006).

Ecuación 1:

$$IPA_j = \sum (Q_i f_i)$$

En donde,

- IPA_j = Índice de Pureza Atmosférica del punto j.
- F_i : Es la frecuencia determinada por unas categorías
- Q_i : Hace referencia al factor de tolerancia de la especie i, que se determina analizando el número de especies acompañantes de una especie determinada.

Ecuación 2:

$$Q_i = \sum \frac{(A_j - 1)}{E_j}$$

Donde:

- Q_i = Factor de tolerancia de la especie i.
- A_j = Número de especies presentes en cada punto (j) donde se encuentra la especie i.
- E_j = Número de estaciones (j), donde se encuentra la especie i.

Entre mayor sea el valor tomado por Q_i , mayor será el grado de sensibilidad de la especie (Kricke y Loppi, 2002).

A partir de la ecuación dos (2) se halló un valor de Q_i para cada especie líquénica presente en cada punto de las diferentes estaciones de muestreo; los valores de Q_i se sumaron para cada estación y dicho valor se utilizó en el cálculo del IPA de cada punto de cada estación, es decir que los tres puntos de muestreo de cada estación tuvieron un mismo Q_i para cada especie.

La categoría de frecuencia líquénica de cada punto de muestreo varía de uno a cinco, según el porcentaje de cobertura de cada especie (Cohn-Berger y Quezada, 2016) y se entiende que la frecuencia de categoría 1 es baja, mientras que la frecuencia de categoría 5 es alta; el porcentaje de cobertura se calculó como el promedio de los porcentajes de cobertura encontrados en cada una de las cuatro caras del árbol (oriente, occidente, norte y sur) y posteriormente como el promedio de cobertura en todos los forófitos que registraron la especie en el punto de muestreo. Para asignar una categoría de frecuencia a cada especie se emplearon los siguientes criterios:

1. Especies presentes entre uno o dos forófitos y tienen un valor de cobertura promedio menor a 20 %: valor asignado 1.
2. Especies presentes en tres o más forófitos y tienen un valor de cobertura promedio menor a 20 %: valor asignado 2.
3. Especies presentes en cuatro o más forófitos y tienen un valor de cobertura promedio entre 20,1 % y 40 %: valor asignado 3.
4. Especies presentes en cuatro o más forófitos y tienen un valor de cobertura promedio entre 40,1 % y 80 %: valor asignado 4.
5. Especies presentes en cuatro o más forófitos y tienen un valor de cobertura promedio entre 80,1 % y 100 %: valor asignado 5 (Figueredo, 2020).

Una vez calculados los valores de IPA, se establecieron rangos de este índice para zonificar cada punto de las ocho estaciones, agrupándolos en cinco niveles de contaminación (máxima, alta, moderada, baja y muy baja), aplicando la metodología de Sturges (1926) y la ecuación 3:

Ecuación 3:

$$K = 1 + 3,322\text{Log}(N)$$

En donde,

- K: es el número de niveles de contaminación.
- N: El número total de puntos de muestreo (en este estudio fueron 25).

Una vez se establecieron los niveles de contaminación, se realizó el cálculo de la longitud o también llamada “amplitud” (ecuación 4), para definir los valores o los rangos de cada nivel de contaminación. Posteriormente se realizó la zonificación de las estaciones de muestreo, haciendo uso del software comercial ArcGIS, y como resultado se generó el mapa de Índice de pureza atmosférica.

Ecuación 4:

$$\alpha = \frac{\text{IPA}_{\text{max}} - \text{IPA}_{\text{menor}}}{K}$$

A partir de los resultados obtenidos de los valores de IPA se realizó un mapa de zonificación con la herramienta ArcGIS donde se ubicaron los puntos de cada estación de muestreo en la capa de delimitación de las veredas; empleando la herramienta de interpolación de datos IDW (Ponderación de distancia inversa) y utilizando el polígono de las ocho veredas como máscara se generó una shape de los valores del IPA para estas zonas.

RESULTADOS

En las ocho estaciones de muestreo se registraron en total 11 especies de líquenes foliosos, distribuidos en seis familias y diez géneros, a saber: *Parmotrema sp 1*, *Ramalina ceslastris* (Spreng.) Krog. & Swinsc, *Usnea sp.*, *Candelaria concolor* (Dicks.) (Arnold), *Heterodermia leucomelos* (L.) Poelt, *Flavopunctelia flaventior* (Stirt.) (Hale), *Teloschistes exilis* (Michx.) Vain., *Chrysothrix sp*, *Parmotrema austrosinense* (Zahlbr.) Hale, *Physcia sp* y *Parmotrema sp 2*.

La familia Parmeliaceae registró una mayor riqueza (45,5 %) y cobertura, seguida de Physciaceae con un 18,2 % y el 9,1 % restante representado por Candelariaceae, Chrysothrichaceae, Ramalinaceae, y Teloschistaceae. La especie más frecuente fue *Parmotrema sp1*, encontrada en 53 de 167 forófitos, seguida de *Physcia sp*. y de *C. concolor*.

Candelaria concolor apareció relativamente con la misma frecuencia en San Rafael, Prado Alto, la Zona urbana, La Selva y los Manzanos (3,0, 2,3, 2,8, 3,0, 2,7 respectivamente), sin embargo, su frecuencia más alta se registró en Pueblo Viejo (4,7); mientras que *Parmotrema sp1* fue muy frecuente

en la vereda de Mancilla, San Rafael y La Tribuna (6,7 6,3 y 6,3, respectivamente) y relativamente frecuente en la vereda de Los Manzanos (4,3). No obstante, *Usnea sp.* presentó una mayor frecuencia en Mancilla, San Rafael y los Manzanos (6,0, 5,7 y 4,7 respectivamente), pero no fue encontrada en la zona urbana del municipio. Las especies de líquenes encontradas con mayor frecuencia en la Zona Urbana fueron *Physcia sp* y *C. concolor*.

Los datos de cobertura mostraron un comportamiento no normal (Shapiro-Wilk: $p < 0,05$) y no se encontraron diferencias significativas en las coberturas de las especies de líquenes, entre las diferentes estaciones (Kruskal-Wallis $p = 0,1714$). A pesar de que los datos de riqueza y abundancia (para este caso registrada como cobertura) entre estaciones fueron diferentes, estadísticamente no se pudo determinar que las coberturas lo fueran. Sin embargo, se debe destacar que la cobertura de *C. concolor* fue visiblemente alta en Pueblo viejo, *Parmotrema sp1* contó con alta cobertura en Mancilla, San Rafael, y La Tribuna, mientras que *Physcia sp* registró alta cobertura en la Zona Urbana del municipio y en Pueblo Viejo (Fig. 1). *R. ceslastris* y *T. exilis* fueron especies que se encontraron con muy bajas coberturas y solo en algunas estaciones (La Selva, Los Manzanos y Mancilla). *Usnea sp* y *H. leucomelos* no contaron con registros de cobertura en la Zona Urbana.

ÍNDICES DE DIVERSIDAD

La vereda La Selva presentó la riqueza más alta y allí se reportaron todas las especies, mientras que Pueblo Viejo, San Rafael y la Zona Urbana registraron los valores de riqueza más bajos (Tabla 1). A partir de los índices de diversidad de Simpson y de Shannon se encontró una mayor diversidad en las veredas de La Selva, Los Manzanos, La Tribuna y Prado Alto. La menor dominancia y mayor equitatividad se presentó en la vereda La Selva, seguida por los Manzanos. Por otro lado, los sitios menos diversos, con mayor grado de

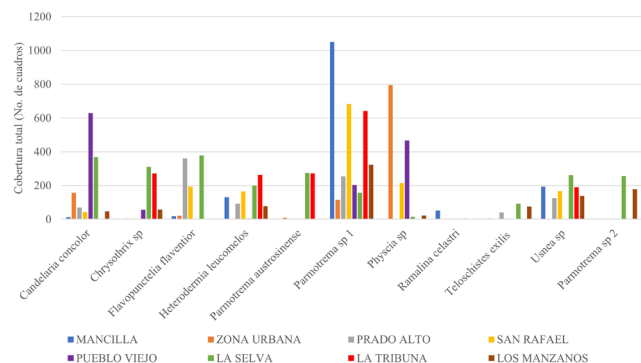


FIGURA 1. Cobertura total (No. de cuadros de la cuadrícula) de cada especie de líquen folioso encontrada en cada estación de muestreo en el municipio de Facatativá, Cundinamarca.

dominancia y menor equitatividad fueron la Zona Urbana y Mancilla, seguidas por Pueblo Viejo.

TABLA 1. Índices de diversidad de líquenes foliosos en cada una de las estaciones de muestreo en el Municipio de Facatativá, Cundinamarca.

| Estación de Muestreo | Riqueza (S) | Dominancia (D) | Simpson (1-D) | Shannon (H) | Equitatividad (J) |
|----------------------|-------------|----------------|---------------|-------------|-------------------|
| Mancilla | 7 | 0,543 | 0,457 | 0,954 | 0,4903 |
| Zona Urbana | 6 | 0,5506 | 0,4494 | 0,889 | 0,4962 |
| Prado Alto | 7 | 0,2529 | 0,7471 | 1,556 | 0,7996 |
| San Rafael | 6 | 0,2822 | 0,7178 | 1,502 | 0,838 |
| Pueblo Viejo | 6 | 0,3543 | 0,6457 | 1,17 | 0,6531 |
| La Selva | 11 | 0,1226 | 0,8774 | 2,165 | 0,903 |
| La Tribuna | 7 | 0,247 | 0,753 | 1,518 | 0,7801 |
| Los Manzanos | 9 | 0,2037 | 0,7963 | 1,809 | 0,8232 |

A partir de los resultados obtenidos del Coeficiente de Similitud de Jaccard, se pudo determinar que entre Mancilla y Prado Alto existe una similitud del 100 % de las especies, La Selva y Los Manzanos presentaron una similitud del 82 %, y La tribuna y Los Manzanos evidenciaron un 77 % de similitud. Por otro lado, la zona urbana del municipio fue la estación con la similitud más baja respecto a las especies encontradas (Fig. 2). A partir de lo anterior se estableció que La Selva, Los Manzanos y La tribuna presentaron una diversidad y equitatividad similares y destacables que las diferencia de Prado Alto y Mancilla, veredas que fueron medianamente diversas y con una equitatividad menor. A pesar de que Prado Alto y Mancilla presentaron las mismas especies, Mancilla fue una vereda menos diversa y con menor equitatividad que Prado Alto (Tabla 1). Por su parte, San Rafael fue una estación con una diversidad considerable, una alta equitatividad y con un 62 % de similitud de especies con Mancilla y Prado Alto.

ÍNDICE DE PUREZA ATMOSFÉRICA

Los resultados del IPA obtenidos permitieron determinar que la Zona Urbana del municipio correspondió a la estación con los niveles de contaminación más altos para este estudio (IPA de 1,14 a 5,04) con una calidad del aire muy mala (Fig. 3), especialmente sobre la avenida Carrera 1ra. Las veredas Mancilla, San Rafael y Prado Alto también reflejaron niveles máximos de contaminación y muy mala calidad del aire (IPA de 1,79 a 13,2). En San Rafael, Pueblo Viejo y La Tribuna se encontraron niveles de contaminación muy altos, y solo en uno punto en la vereda de

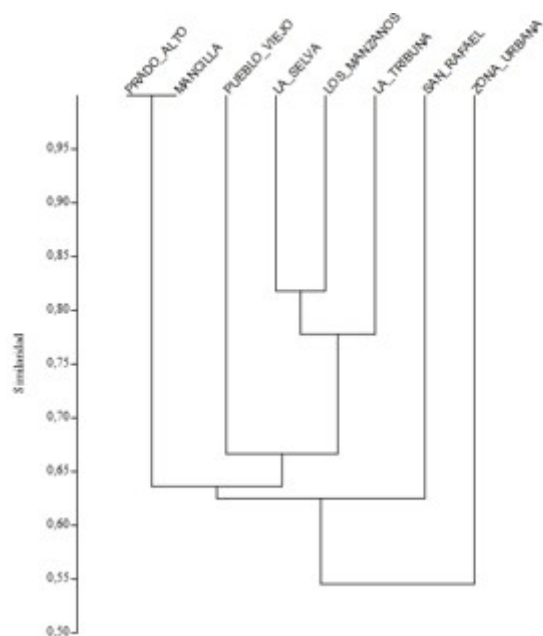


FIGURA 2. Dendrograma de agrupación según el índice de similitud de Jaccard para las estaciones de muestreo en el Municipio de Facatativá, Cundinamarca.

Pueblo Viejo se registró un valor de contaminación moderada, (IPA de 22,55); éste último correspondió al punto más alejado de la Carrera 1ra (Fig. 3). Por otro lado, Los Manzanos presentó niveles de contaminación moderada y una calidad de aire medianamente mala (IPA de 16,43 a 22,45), mientras que La Selva resultó ser la estación con el menor nivel de contaminación y una calidad de aire buena (IPA de 32,90 a 42,30).

Por otro lado, en el proceso de obtención del IPA, se determinó el valor de Q_i representa el grado de sensibilidad o el factor de tolerancia de las especies, asumiendo que la contaminación de las zonas reducirá la diversidad de especies sensibles, es decir, que el factor de tolerancia es inversamente proporcional al grado de contaminación (Rubiano y Chaparro de Valencia, 2006). Se estableció que para las condiciones atmosféricas de Facatativá especies como *H. leucomelos* y *Usnea sp* se comportaron de manera tolerante, mientras que *R. celsi* y *Parmotrema sp2* se registraron como las especies más sensibles a la contaminación. *Flavopuntelia flaventior*, *Teloschistes exilis* y *Chrysothrix sp* mostraron un comportamiento medianamente tolerante a los contaminantes (Tabla 2).

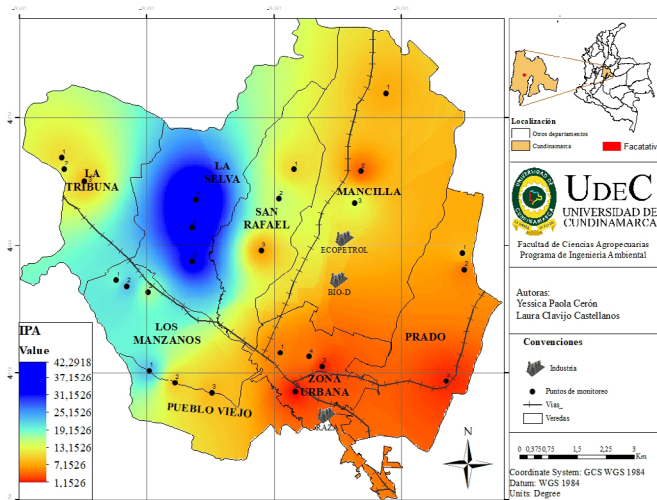
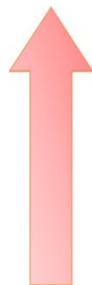


FIGURA 3. Mapa de zonificación de los IPA encontrados para las diferentes estaciones de muestreo en el Municipio de Facatativá, Cundinamarca. (Fuente: Elaboración propia). Las categorías de calidad del aire a partir de los valores de IPA que se establecieron fueron seis: contaminación Máxima (IPA de 0 a 7), Muy alta (IPA de 7,1 a 14), Alta (IPA de 14,1 a 21), Moderada (IPA de 21,1 a 28), Baja (IPA de 28,1 a 35) y Muy baja (IPA de 35,1 a 42).

Tabla 2. Factor de tolerancia de las especies de líquenes a los diferentes contaminantes atmosféricos (a mayor valor del factor, menor es la tolerancia a los contaminantes).

| ESPECIES | Factor de tolerancia (Q _i) | |
|---------------------------------|--|--------------------|
| <i>Ramalina celastri</i> | 3,26 | Mayor sensibilidad |
| <i>Parmotrema sp2</i> | 2,14 | |
| <i>Parmotrema austrosinense</i> | 1,64 | |
| <i>Flavopuntelia flaventior</i> | 1,48 | |
| <i>Teloschistes exilis</i> | 1,15 | |
| <i>Chrysothrix sp</i> | 1,13 | |
| <i>Physcia sp</i> | 0,97 | |
| <i>Candelaria concolor</i> | 0,88 | |
| <i>Heterodermia leucomelos</i> | 0,78 | |
| <i>Usnea sp</i> | 0,74 | |
| <i>Parmotrema sp1</i> | 0,73 | Menor sensibilidad |



DISCUSIÓN

A partir de los hallazgos de esta investigación, se logró determinar que hubo un cambio en la composición de especies liquénicas, que dependen de las condiciones ambientales. La intensidad vehicular y la industrialización que se presenta en la Zona Urbana del municipio, aportando una mayor cantidad de contaminantes atmosféricos que en las áreas rurales, tienen un impacto de gran importancia sobre este cambio en composición de especies.

La atmósfera de la zona urbana contiene material particulado (PM) suspendido en el aire, el cual está compuesto por sulfatos, nitratos, cloruro de sodio y otros, debido a la alta circulación de tráfico pesado (vehículos de carga) y especialmente de vehículos particulares (Bernal y Sandoval, 2017), que en promedio corresponden a 24124 vehículos transitando durante 24 horas (Gobernación de Cundinamarca et al., 2014). En relación con lo anterior, se logró determinar la existencia de menos especies de líquenes foliosos con una menor frecuencia en la zona urbana del municipio, por lo tanto, los pocos forófitos encontrados con las especies de líquenes daban un panorama de cuanto están expuestas a los contaminantes debido al alto tráfico vehicular (Canseco et al., 2006); una de las especies que tuvo una mayor frecuencia en esta zona fue *Physcia sp*, especie que se caracteriza por ser altamente tolerante a los contaminantes (Figueredo, 2020), incluso se llega a beneficiar de la presencia o el aumento de los contaminantes atmosféricos que estén presentes en la zona, especialmente del Nitrógeno (Sipman, 2009). Para este estudio, *Physcia sp* fue la especie con más cobertura dentro de la Zona Urbana (Fig. 1), situación que puede corresponder a una menor sensibilidad frente a la contaminación.

Para el caso de *C. concolor*, se registró prácticamente en todas las estaciones, con coberturas amplias tanto en sitios altamente contaminados, como en sitios con una calidad del aire buena; esto se puede explicar gracias a reportes en los que *C. concolor* suele responder con una alta tolerancia a los contaminantes (Sáenz et al., 2007; Rincón, 2012)

Por el contrario, las especies *Usnea sp* y *H. leucomelos* no tuvieron registros dentro de la Zona Urbana, ni en el tercer punto de Prado Alto y Pueblo Viejo, los cuales fueron los más cercanos a la Zona Urbana. Ambas especies reflejaron una cobertura moderada en La tribuna y La Selva debido a que éstos sitios se consideran menos contaminadas (Fig. 3), condición que favorece a los individuos de estas especies. *Usnea sp* también presentó una cobertura alta en el primer punto de Mancilla, el más alejado de la urbe y con mejores condiciones de vegetación y humedad; sin embargo, también se registró con coberturas consideradas moderadas a altas en Prado Alto y San Rafael, estaciones con una muy mala calidad de aire. Algunas especies del género *Usnea* (Estrabou, 1998, como se citó en Torres, 2019), se han identificado como especies sensibles a los cambios producidos por los contaminantes atmosféricos, aunque las especies parcialmente indeterminadas como *Parmotrema sp.*, *Usnea sp* y *Chrysothrix sp* no permitieron comparaciones con otros estudios porque son géneros que cuentan con especies sensibles y no sensibles. En un análisis realizado por Barreno y Pérez (2003) se reportó a una especie del género *Usnea* como sensible al SO₂, sin embargo, encontraron una cobertura destacable en sitios donde se registró este contaminante. De la misma manera, en esta investigación, *Usnea sp* se registró como especie tolerante (Tabla 2), debido a su alta cobertura en estaciones con niveles de contaminación

moderada y alta como Mancilla, San Rafael y La Tribuna. Por lo anterior, se establece que para definir si las especies que se registraron en el municipio son tolerantes o sensibles, hace falta alcanzar una determinación taxonómica exacta (Aragón et al., 2008).

Figueredo (2020) menciona que posiblemente las especies de líquenes pueden llegar a ser más tolerantes cuando tiene una menor área de contacto con el ambiente, así como la especie *H. leucomelos* que se desarrolló y presentó alta cobertura en la vereda de Mancilla, pero que presentó un mayor crecimiento en ambientes con alta humedad (Rodríguez et al., 2009) y con mejor calidad del aire (Figs. 1 y 3).

Las especies *Chrysothrix sp* y *P. austrosinense* contaron con coberturas muy bajas o nulas en la Zona Urbana, Prado Alto y San Rafael, pero coberturas altas en La Selva y La Tribuna, lo cual no es coherente porque *P. austrosinense* se ha considerado una especie toxófila (Simijaca et al., 2014).

Teloschistes exilis tuvo su mayor presencia y cobertura en La Selva y Los Manzanos, estaciones con una calidad del aire buena en general, sin embargo, las coberturas de esta especie siempre fueron bajas (Fig. 1). Se puede afirmar que ésta es una especie toxifóbica o poco tolerante a contaminantes, ya que en estudios realizados anteriormente (Lijteroff et al., 2009) se observó como *T. exilis* tiende a ser más sensible a la presencia de contaminantes y con ausencia total en zonas urbanas. Según González et al. (2016), *T. exilis* es especialmente sensible a las concentraciones elevadas de SO_2 . Lo anterior corroboró que los niveles de contaminación en general en las veredas del municipio son altos y alcanzan a afectar las zonas más alejadas de las avenidas principales, limitando el crecimiento de especies sensibles.

Flavopunctelia flaventior se encontró con mayor cobertura en estaciones con niveles intermedios de contaminación, como Prado Alto y San Rafael, pero también en La Selva, sitio con las mejores condiciones en términos de calidad del aire. Lo anterior corresponde a que ésta es una especie con sensibilidad media a los contaminantes atmosféricos (González et al., 2016). Sin embargo y de acuerdo con Perlmutter (2010), como se citó en González et al., (2016) *F. flaventior* es tolerante a la contaminación colonizando de forma abundante forófitos en ciudades contaminadas, y su presencia es evidente por su alto desarrollo en gran parte de las zonas cercanas a áreas con mayor desarrollo urbanístico. Además, suele ser una especie que se distribuye ampliamente en áreas de clima templado y/o tropical, pero también resistente a zonas con poca o alta contaminación o de sensibilidad intermedia (Rubiano y Chaparro de Valencia, 2006).

A pesar de que Mancilla y La Zona Urbana cuentan con una cobertura considerable para especies como *Parmotrema Sp1*, *C. concolor* y *Physcia sp*, estas estaciones no reflejan la diversidad y equitatividad encontradas en Los Manzanos, La Selva, La Tribuna, o incluso en Prado Alto y San Rafael; la explicación a ello es que la comunidad de organismos que está expuesta a algún disturbio ambiental, que en este caso correspondería a contaminación atmosférica, genera que

muy pocas especies respondan de forma competitiva y resiliente, aumentando su cobertura y frecuencia, muy por encima de las demás especies. En muchos de los casos se pierde diversidad y riqueza (como en la Zona Urbana y Mancilla) no solo por el disturbio si no por la capacidad competitiva de las especies resilientes que permanecen.

Todo lo anterior se relaciona estrechamente con los hallazgos de la calidad del aire en las diferentes estaciones, de tal forma que las áreas con mayor diversidad y equitatividad corresponden a los puntos más alejados de las avenidas principales, por lo tanto, a áreas con mejor calidad de aire. Sin embargo, se hizo evidente que las zonas con diversidad intermedia, como San Rafael y Pueblo Viejo arrojaron niveles de pureza atmosférica bajos y niveles de contaminación máxima, debido a la participación de *Physcia sp.*, especie tolerante a los contaminantes atmosféricos.

Por otro lado, La Zona Urbana y Mancilla fueron estaciones con diversidad y equitatividad de especies baja, situación que se relaciona con el alto tráfico vehicular y la incidencia de emisiones industriales a cargo de Bio D, Ecopetrol, Alimentos Concentrados Raza y Alimentos Polar (los dos últimos ubicados dentro de la Zona Urbana).

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, se determinó que *R. celastri*, *Parmotrema sp 2* y *P. austrosinense* presentaron mayor sensibilidad y menor tolerancia a los contaminantes (Tabla 2), lo anterior con algunas correspondencias a lo encontrado por Will-Wolf et al. (2015, 2018). De otro lado, *Chrysothrix sp*, *Physcia sp*, *C. concolor* y *H. leucomelos* resultaron ser especies con sensibilidad intermedia o baja y relativamente tolerantes; Según reportes, algunas especies de un mismo género pueden ser tolerantes o toxófilas y prosperar en ambientes contaminados, mientras que otras pueden ser sensibles y desaparecer de dichos lugares (Deltoro et al., 1999; Will-Wolf et al., 2018), como en el caso de *C. concolor* que es una especie tolerante pero resulta ser sensible a concentraciones de NO_2 (Will-Wolf et al., 2015; Gonzales et al., 2016) y varios líquenes de la familia *Physciaceae* que soportan sitios con altos niveles de contaminación (Sáenz et al., 2007).

Las especies de líquenes que llegan a presentar mayor tolerancia a la contaminación se pueden encontrar en la mayoría de los sitios muestreados como *C. concolor*, que con una tolerancia de 0,88 se encontró en el 72 % de los puntos muestreados, es decir, esta especie se puede desarrollar tanto en lugares con contaminación donde se hace impredecible el flujo vehicular, como en lugares sin o con baja contaminación en donde los factores climáticos favorecen el crecimiento y desarrollo de la especie (Canseco et al., 2006).

CONCLUSIONES

La composición de las comunidades de líquenes en los sitios evaluados está conformada por diez especies, distribuidos en seis familias y nueve géneros, la familia Parmeliaceae es una de las que presenta mayor cobertura y riqueza en los

líquenes de crecimiento folioso. Las veredas con mayor biodiversidad y equitatividad correspondieron a La Selva, Los Manzanos y La Tribuna, sitios con una calidad de aire buena y medianamente mala, que presentaron una alta cobertura de especies como *Usnea sp*, *H. leucomelos* y *Chrysothrix sp*, quienes son comúnmente reportadas como especies sensibles a la contaminación atmosférica. Se registraron especies con sensibilidad a los contaminantes como *R. ceslastris* y *T. exilis* pero con poca cobertura en estas estaciones con una calidad del aire relativamente buena.

Mancilla y La Zona Urbana correspondieron a las estaciones con menor biodiversidad, menos equitatividad y mayor dominancia de especies tolerantes a los contaminantes atmosféricos como *Physcia sp*, y *Parmotrema sp1*, y con los niveles más bajos de calidad del aire.

Las especies de líquenes más sensibles a la contaminación fueron *R. Celsa*, *Parmotrema Sp2* y *P. austrosinense*. La distribución de estas especies en zonas con menor influencia vehicular corresponde a lo esperado. *F. flaventior* es una especie reportada por diferentes autores como toxófila o tolerante a contaminantes, y para este estudio se registró su mayor cobertura en estaciones con niveles de contaminación alta (Prado Alto y San Rafael) y en la de mejor calidad del aire (La Selva).

A pesar de que la información de la presente investigación presenta un panorama inicial de las condiciones de calidad del aire en el Municipio de Facatativá, se considera importante realizar e implementar monitoreos de la calidad del aire, debido a la poca información existente dentro del municipio de Facatativá y de la posible afectación a la salud de la comunidad por contaminación atmosférica; también es importante contrastar los resultados biológicos con valoraciones tradicionales de la calidad del aire, evaluando el material particulado PM10 y las concentraciones de gases contaminantes (NO_x , SO_x y CO) para corroborar la información fisicoquímica con la diversidad y la cobertura de las especies de líquenes.

PARTICIPACIÓN DE AUTORES

Clavijo Castellanos, Cerón Pedraza, Ballesteros Pintor y Castañeda Celeita participaron en el diseño de la propuesta, en la selección de sitios de muestreo, en todas las salidas de campo y en la toma de datos de coberturas. En este proceso Aguirre Ceballos contribuyó de manera importante en algunas salidas de campo para la identificación de géneros y especies de líquenes, así como en el adiestramiento de los demás autores en la determinación taxonómica general. El procesamiento de la información básica y la obtención de resultados estuvo a cargo de Clavijo Castellanos, Cerón Pedraza y Ballesteros Pintor, resultados que fueron discutidos y mejorados con la participación de Castañeda Celeita y Aguirre Ceballos. La redacción del artículo estuvo en cabeza de Ballesteros Pintor, con la colaboración y aportes de los demás investigadores.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Cundinamarca y a la Universidad Nacional de Colombia por la financiación y el apoyo académico, a las Direcciones de Investigación de ambas instituciones por el trabajo mancomunado que facilitó el proceso administrativo, al Biólogo David Cortes y al grupo de investigación “Biología de las criptógamas” por la determinación de las especies líquénicas y al Biólogo Mateo Sebastián Jaimes por el reconocimiento de las especies de forófitos.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores no están involucrados en ningún conflicto de intereses.

REFERENCIAS

- Albornoz, A., Guerrero, C., y De Luque M. (2019). Inventario de emisiones atmosféricas de CO₂ provenientes de fuentes móviles en el municipio de Mosquera por medio del Modelo IVE [Tesis de pregrado]. Universidad de Cundinamarca. <http://hdl.handle.net/20.500.12558/1665>
- Aragón, G., Belinchón, R., y Izquierdo, P. (2008). Valoración de la diversidad de líquenes epífitos en bosques de quercíneas mediante un nuevo índice líquénico (IDLE). Aplicación a la Red Natura 2000. *Botanica Complutensis*, 32:37-48.
- Barreno, E., y Pérez S. (2003). *Líquenes de la Reserva Natural Integral de Muniellos, Asturias*. KRK Ediciones.
- Bernal, P., y Sandoval, A. (2017). Inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes móviles en el municipio de Facatativá mediante la implementación de la metodología CORINAIR 2016 (EEA) [Tesis de pregrado]. Universidad de Cundinamarca. <https://acortar.link/bYHxeP>
- Cohn-Berger, G., y Quezada, M. (2016). Líquenes como bioindicadores de contaminación aérea en el corredor metropolitano de la ciudad de Guatemala. *Revista Científica de La Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia*, 26(1):20–39. <https://doi.org/10.54495/Rev.Cientifica.v26i1.79>
- Canseco, A., Anze, R., y Franken, M. (2006). Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Acta Nova*, 3(2):286–307.
- Deltoro, V., Gimeno, C., Calatayud, A., y Barreno, E. (1999). Effects of SO₂ fumigations on photosynthetic CO₂ exchange, chlorophylla fluorescence emission and antioxidant enzymes in the lichens *Evernia prunastri* and *Ramalina farinacea*. *Physiologia Plantarum*, 105(4):648-654. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1999.105408.x>
- Figueredo, C. A. (2020). Uso de líquenes foliosos como bioindicadores de la calidad del aire de Bogotá, D. C.

- C. [Tesis de pregrado]. Universidad de la Salle. <https://ciencia.lasalle.edu.co/biologia/86>
- Figuroa, E., y Méndez, P. (2015) Evaluación de la calidad del aire en ocho zonas de la ciudad de Bogotá utilizando los líquenes como bioindicadores [Tesis de pregrado]. Universidad de la Salle. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/3
- Giordani, P. (2007). Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution*, 146(2):317–323.
- García, J. (2004). Mapa de estrés atmosférico de Cedritos (Bogotá) a partir de diversidad líquénica [Tesis de Pregrado]. Universidad el bosque.
- Gobernación de Cundinamarca, Secretaría de Tránsito y Movilidad, y Universidad Distrital Francisco José de Caldas. (2014). Plan Maestro de Movilidad Urbano. Contrato administrativo N° 074 de 2013–Municipio De Facatativá.
- Gonzales, N., Luján, M., Navarro, G., y Flores, R. (2016). Aplicabilidad de líquenes bioindicadores como herramienta de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba. *Acta Nova*, 7(4):455-482.
- Hammer, O., Harper, D., y Ryan, P. (2006). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontología Electrónica*, 4(1):1-9.
- Kricke, R., y Loppi, S. (2002). Bioindication: The I.A.P. approach. In: P. L. Nimmis, C. Scheidegger & P. A. Worsley (Eds.), *Monitoreo con líquenes — Monitoreo de líquenes*. (Serie científica de la OTAN, Vol. 7). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_4
- Lijteroff, R., Lima, L., y Prieri, B. (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.
- Ochoa-Jiménez, D. A., Cueva-Agila, A., Prieto, M., Aragón, G., y Benitez, A. (2015). Cambios en la composición de líquenes epífitos relacionados con la calidad del aire en la ciudad de Loja (Ecuador). *Caldasia*, 37(2):333-343. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v37n2.53867>
- Rincón, A. (2012). Análisis de la expansión urbana del municipio de Facatativá desde las políticas de ordenamiento territorial en el periodo 2002-2011. *Perspectiva Geográfica*; 17:123–146.
- Rodríguez, J. M., Estrabou, C., Fenoglio, R., Robbiati, F., Salas, M., y Quiroga, G. (2009). Recuperación post-fuego de la comunidad de líquenes epífitos en la provincia de Córdoba, Argentina. *Acta Botánica Brasilica*, 23(3):854–859. <https://doi.org/10.1590/S0102-33062009000300026>
- Romero, P. (2013). Líquenes cortícolas como indicadores atmosféricos en la localidad de Kennedy Bogotá, Colombia. *Semillas Ambientales*, 7(1).
- Rubiano, L., y Chaparro de Valencia, M. (2006). Delimitación de áreas de isocontaminación atmosférica en el campus de la Universidad Nacional de Colombia mediante el análisis de bioindicadores (Líquenes epífitos). *Acta Biológica Colombiana*, 2-11.
- Rubiano, R. M. (2010). Fortaleza De Piedra, Cruce de caminos Facatativá. Secretaria de Cultura y Juventud, Centro de historia, Facatativá- Cundinamarca. Universidad Externado de Colombia.
- Sáenz, A., Flores, F., Madrigal, L., y Di Stefano, J. D. (2007). Estimación del grado de contaminación del aire por medio de la cobertura de líquenes sobre troncos de árboles en la ciudad de San José, Costa Rica. *Brenesia*, 68:29-35.
- Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Biológicos SSF. (2000). “Inventario de Líquenes Epífitos” en Manual Red CE de Nivel II, 1(8).
- Simijaca, D. F., Morales, M. E., y Vargas, D. L. (2014). Uso de organismos vegetales no vasculares como indicadores de contaminación atmosférica urbana (Tunja, Boyacá, Colombia). *Acta Biológica Colombiana*, 19(2):221–231. <https://doi.org/10.15446/abc.v19n2.40681>
- Sipman, H. J. M. (2009). Tropical urban lichens: Observations from Singapore. *Blumea: Journal of Plant Taxonomy and Plant Geography*, 54(1-3):297–299. <https://doi.org/10.3767/000651909X476328>
- Steubing, L., y Fangmeier, A. (1992). Pflanzenoekologisches Praktikum. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, Alemania, pp. 205.
- Sturges, H. A. (1926). The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153):65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Torres, M. (2019). Líquenes: Los bioindicadores de la calidad del aire. [Tesis de Pregrado]. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
- Will-Wolf, S., Jovan, S., Neitlich, P., Peck, J. E., y Rosentreter, R. (2015). Lichen-based indices to quantify responses to climate and air pollution across northeastern U.S.A. *The Bryologist*, 118(1):59-82. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-118.1.059>
- Will-Wolf, S., Jovan, S., Nelsen, M. P., Trest, M. T., Rolih, K. M., y Reis, A. H. (2018). Lichen indices assess local climate and air quality status in the Mid-Atlantic Region, U.S.A. *The Bryologist*, 121(4):461-479. <https://doi.org/10.1639/0007-2745-121.4.461>