

## USO DE ORGANISMOS VEGETALES NO VASCULARES COMO INDICADORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA (TUNJA, BOYACÁ, COLOMBIA)

### Use of Non Vascular Plant Organisms as Indicators of Urban Air Pollution (Tunja, Boyacá, Colombian)

DIEGO FERNANDO SIMIJACA-SALCEDO<sup>1</sup>, Biólogo; DIANA LUCIA VARGAS-ROJAS<sup>2</sup>, Bióloga; MARIA EUGENIA MORALES-PUENTES<sup>3</sup>, Ph. D.

<sup>1</sup> Programa Manejo, Uso y Conservación del Bosque, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Carrera 4 # 26B 54. Bogotá, Colombia. dsimijacasalcedo@gmail.com

<sup>2</sup> Sistemática Vegetal. Laboratorio de sistemática y reproducción de fanerógamas. Universidad Federal de Viçosa. Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitario, Viçosa – MG, Brasil. diluvaro@gmail.com

<sup>3</sup> Escuela de Biología, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Avenida Central del Norte - Campus Universitario C-119, Herbario. Tunja, Boyacá, Colombia. maria.morales@uptc.edu.co

Autor de correspondencia: María Eugenia Morales-Puentes, maria.morales@uptc.edu.co

Presentado el 6 de noviembre de 2013, aceptado el 4 de febrero de 2014, fecha de reenvío el 17 de febrero de 2014.

Citation / Citar este artículo como: SIMIJACA-SALCEDO DF, VARGAS-ROJAS DL, MORALES-PUENTES ME. Uso de organismos vegetales no vasculares como indicadores de contaminación atmosférica urbana (Tunja, Boyacá, Colombia). Acta biol. Colomb. 2014;9(2):221-232.

#### RESUMEN

Los líquenes y briófitos son organismos útiles en la determinación de la calidad del aire. En la ciudad de Tunja (departamento de Boyacá, Colombia), es evidente la escasez de zonas verdes por el aumento en las construcciones, lo que contribuye al detrimento de la pureza atmosférica y trae consigo el deterioro de la salud de la ciudadanía y la reducción de los hábitats y poblaciones de las plantas criptógamas. Mediante la determinación del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) se identificaron las zonas con mayor influencia de contaminantes del aire. *Parmotrema austrosinense* corresponde a la especie más frecuencia; y la estación de la Normal Femenina, con IPA de 52,2196 es influenciada por los contaminantes atmosféricos; las estaciones de los Parques Santander y Semáforos son las más contaminadas (IPA 8,5333) con solo dos especies (*Heterodermia albicans* y *Lobariaceae* sp.). Se destaca la evaluación en la Reserva Forestal Protectora El Malmo con un IPA de 34,0281 y 23 especies. Los valores de IPA se agruparon en zonas de isocontaminación para ser representados cartográficamente. El uso de organismos bioindicadores es una estrategia natural y económica que permite zonificar las urbes y enfocar planes para revegetalización de ciudades, generando la disminución del impacto de contaminantes en el aire con el fin de mejorar la calidad de vida de los pobladores.

**Palabras clave:** briófitos, contaminación, índice, líquenes, urbano.

#### ABSTRACT

Lichens and bryophytes are useful organisms in air quality determination. In the city of Tunja (Boyacá, Colombia), is evident the lack of green areas by the increase of building, which contributes to the detriment of the atmospheric purity making unhealthy conditions to the citizens and habitats and population reduction of cryptogamic plants. Using the Index of Atmospheric Purity (IAP) we identified the greater influence air pollutants areas. *Parmotrema austrosinense* has the highest frequency; and the Normal Femenina station with an IAP of 52,2196 is an atmospheric pollutants influenced area; Parque

Santander and Semáforos, are the most contaminated (IAP 8,5333) with only two species (*Heterodermia albicans* and *Lobariaceae* sp.). We highlight the evaluation in the Reserva Forestal Protectora El Malmo with an IAP of 34,0281 and 23 species. IAP values were grouped in isocontamination areas to be represented cartographically. The use of bioindicators organisms is a natural and economic strategy allowing us to mapping urban areas and make revegetation cities designs, generating the contaminants diminution air impact improving the citizen's life quality.

**Keywords:** bryophyte, contamination, index, lichens, urban.

## INTRODUCCIÓN

El incremento de la emisión de compuestos tóxicos en los últimos años es un problema en aumento y que afecta a países en vía de desarrollo como consecuencia del crecimiento de los centros urbanos y la instalación de industrias (Rubiano, 1987). En la ciudad de Tunja, como consecuencia del crecimiento urbanístico y la disímil utilización del suelo, se observa un detrimento de las áreas verdes, lo cual incide en la presencia de altos niveles de contaminación que llevan al deterioro de la flora y fauna de la ciudad, además de producir diversas enfermedades de tipo respiratorio en la población.

De acuerdo con Rubiano (1987) los procedimientos fisicoquímicos asociados a la información de las estaciones meteorológicas acerca de las emisiones gaseosas, determinan los niveles de contaminación atmosférica en las grandes ciudades de Colombia. No obstante, estos monitoreos son escasos e implican altos costos (Chaparro y Aguirre, 2002).

Es así como los líquenes y briófitos epífitos, resultan ser muy efectivos como sistemas de alerta, debido a que permiten detectar tempranamente signos de cambio ambiental (Méndez y Monge, 2011; Santoni y Lijteroff, 2006). Lo anterior, se fundamenta en que los organismos epífitos no vasculares reciben la mayor parte de nutrientes directamente de la atmósfera (Hawksworth *et al.*, 2005), además están desprovistos de cutícula, lo que les otorga el carácter poiquilohídrico y permite la recepción de nutrientes y contaminantes aéreos (Chaparro y Aguirre, 2002), como SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, HF y HCl (Nash y Wirth, 1988; Chaves, 2005; Rubiano y Chaparro, 2006; Gómez *et al.*, 2013).

Santoni y Lijteroff (2006) mencionan que la calidad del aire está ligada a la reducción y desaparición de los grupos de líquenes más sensibles y la dominancia de los más resistentes, condición que permite observar el grado de resistencia de los organismos criptógamos (Crespo *et al.*, 1977) y la disminución de los organismos más susceptibles al impacto de los contaminantes.

La evaluación de la calidad de aire mediante organismos no vasculares, hace posible evidenciar respuestas fisiológicas y comportamentales que pueden interpretarse a corto plazo, a través de análisis que generan información para identificar

el grado de sensibilidad o tolerancia de una especie determinada. Estos análisis se han llevado a cabo mediante el mapeo y la comparación de la riqueza, abundancia y frecuencia de las comunidades de líquenes y briófitos en áreas delimitadas (Méndez y Monge, 2001; Simijaca *et al.*, 2011; Gómez *et al.*, 2013; Seed *et al.*, 2013), para lo cual, se ha usado más frecuentemente el IPA (Índice de Pureza Atmosférica) descrito por LeBlanc y De Sloover (1970), con algunas modificaciones de acuerdo al contexto del análisis (Giordani *et al.*, 2012).

También es frecuente el registro y monitoreo de taxones específicos como *Hereteodermia obscurata* y *Parmotrema tinctorum*, cuyo potencial bioindicador es ampliamente reconocido mediante pruebas de estadística descriptiva como la prueba de Monte Carlo o por las evidencias fisiológicas que presentan ante la concentración de contaminantes (Kaffer *et al.*, 2011; Segura, 2013).

El presente estudio permite dar una aproximación al nivel de contaminación atmosférica de la ciudad de Tunja, a partir del uso de líquenes como bioindicadores, y así establecer áreas de isocontaminación atmosférica de Tunja, mediante el uso IPA, con el fin de proponer pautas que propendan al buen uso y mantenimiento de los recursos naturales de la ciudad.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La ciudad de Tunja se encuentra ubicada a 5°32'07"N 73°22'04"W, en una meseta que se extiende sobre la Cordillera Oriental colombiana. Comprende un rango altitudinal entre 2782-3124 m s. n. m. y presenta una temperatura promedio de 13 °C (Concejo Municipal de Tunja, 2007).

### Recolección de datos

Se seleccionaron 25 estaciones de muestreo correspondientes a las áreas verdes más representativas de la zona rural y urbana de la ciudad de Tunja (Tabla 1). En cada estación se evaluaron y marcaron cuatro forofitos adultos de corteza consistente y diámetro >10 cm (Canseco *et al.*, 2006), en donde se recolectó la flora no vascular presente desde la base del árbol hacia el follaje, es decir, de cero a dos metros. De acuerdo con las observaciones de Medina (2002) y Rubiano (1987), no se incluyen árboles en contacto directo con vías de comunicación (autopistas y carreteras).

La estimación de coberturas se realizó según Iwatsuki (1960) y se modificó a una plantilla de acetato de 27 x 21 cm, con la que se realizaron levantamientos de acuerdo a la abundancia y distribución de las plantas no vasculares sobre el forofito. Además, se registró la posición del vástago o talo liquénico, su estado general, coloración y presencia/ausencia de estructuras reproductivas.

El material recolectado se identificó en el Herbario UPTC, mediante el uso de claves especializadas (Churchill y Linares, 1995; Uribe y Aguirre, 1997; Chaparro y Aguirre, 2002) y

Tabla 1. Descripción de las estaciones de muestreo ubicadas en sentido sur-norte.

Sitio de muestreo	Tipo de zona	Tipo de vía	Altura edificios (pisos)	Área verde (%)	Forofito
Reserva Forestal Protectora (RFP) Malmo	Rural	Avenida ancha	2	90	<i>Ageratina tinnifolia</i>
Ciudad Jardín	Residencial-Rural	Avenida angosta	2 a 3	70	<i>Duranta espinosa</i>
Mirador Escandinavo	Residencial-Rural	Calle angosta	2 a 3	70	<i>Acacia melanoxilon</i>
INEM Carlos Arturo Torres Peña	Inst. Educativa	Calle angosta	4	20	<i>Fraxinus chinensis</i>
Barrio de la República	Residencial	Plaza cuadrada	2 a 6	40	<i>Solanum</i> sp.
Parque Pinzón	Comercial	Plaza cuadrada	3 a 6	40	<i>Acacia melanoxilon</i>
Parque Santander	Comercial	Plaza cuadrada	3 a 6	30	<i>Yucca elephantipes</i>
Parque Semáforos	Comercial	Plaza cuadrada	3 a 6	30	<i>Yucca elephantipes</i>
Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), sede Medicina	Inst. Educativa	Calle angosta	2 a 4	30	<i>Pittosporum undulatum</i>
Parque Maldonado	Residencial	Plaza cuadrada	2 a 4	40	<i>Pittosporum undulatum</i>
Aeropuerto	Rural	Avenida ancha	3	90	<i>Acacia melanoxilon</i>
Registro y Admisiones UPTCc*	Inst. Educativa	Calle angosta	3	20	<i>Tecoma stans</i>
Muro UPTCc*	Inst. Educativa	Calle angosta	5	20	<i>Tecoma stans</i>
FESAD UPTCc*	Inst. Educativa	Calle angosta	5	30	<i>Pittosporum undulatum</i>
Invernadero UPTCc*	Inst. Educativa	Calle angosta	5	40	<i>Pittosporum undulatum</i>
Cafetería UPTCc*	Inst. Educativa	Calle angosta	2 a 5	30	<i>Tecoma stans</i>
Plazoleta central 1 UPTCc*	Inst. Educativa	Plaza cuadrada	5	45	<i>Tecoma stans</i>
Plazoleta central 2 UPTCc*	Inst. Educativa	Plaza cuadrada	5	45	<i>Tecoma stans</i>
Sendero Ecológico UPTCc*	Inst. Educativa	Sendero peatonal	2 a 5	70	<i>Acacia melanoxilon</i>
Clínica Veterinaria UPTCc*	Inst. Educativa	Avenida angosta	2	70	<i>Malus</i> sp.
Normal Femenina	Inst. Educativa	Plaza cuadrada	3	45	<i>Tabebuia</i> sp.
Vía Arcabuco	Residencial-Rural	Avenida angosta	3	60	<i>Eucaliptus</i> sp.
Barrio Asís	Residencial	Avenida ancha	3	70	<i>Duranta espinosa</i>
Seminario Mayor	Residencial	Plaza cuadrada	3	40	<i>Pittosporum undulatum</i>
Cementerio Jardines	Residencial-Rural	Plaza cuadrada	2	70	<i>Fraxinus chinensis</i>

\*UPTCc = sede central

trabajo detallado y juicio de microcopia para la determinación de las especies, y también se compararon con los ejemplares de la colección de referencia de dicho Herbario.

### Análisis de datos

Para estimar los niveles de contaminación se tuvo en cuenta la propuesta de Rubiano (1987) y Rubiano y Chaparro (2006), quienes modifican aspectos del IPA indicado por LeBlanc y De Sloover (1970) y lo calculan así:

$$IPA = Q_i \times F_i / n \times C_i$$

Q<sub>i</sub>: índice de resistencia (número de especies acompañantes / número de estaciones donde está la especie).

F<sub>i</sub>: número de hospederos o forofitos en los que aparece la especie.

n: total de forofitos censados.

C<sub>i</sub>: promedio de cobertura (cobertura total de la especie/ máximo valor alcanzado).

El tratamiento estadístico de los datos, los índices de Simpson (D'), Equidad (H), así como los clústeres, se calcularon con el uso del *software* Past (Hammer *et al.*, 2001).

La identificación de las zonas de isocontaminación, se realizó a partir de la marcación de polígonos sobre el mapa de la ciudad, que agrupa zonas con similitud en la influencia de los contaminantes, teniendo como referencia a las estaciones de muestreo. La marcación de los polígonos obedece a la escala planteada por Rubiano y Chaparro (2006), que establecen intervalos de acuerdo a los resultados obtenidos y agrupan las estaciones para determinar los niveles de contaminación (máxima, baja y muy baja). La representación cartográfica se digitalizó y trabajo con el *software* ArcGis versión 9.3, donde se ubicaron las estaciones de muestreo geore-

ferenciadas y a partir de las cuales se generaron los polígonos de áreas de isocontaminación.

## RESULTADOS

La ciudad de Tunja fue recorrida en sentido sur-norte y se seleccionaron 25 zonas de muestreo de acuerdo a la exuberancia de los talos líquénicos y a la presencia de forofitos aptos para la evaluación. De tal manera que fueron incluidas zonas residenciales, comerciales, instituciones educativas y algunas estaciones cercanas al área rural, que a su vez presentan diferentes tamaños en las edificaciones y dimensiones de las vías de acceso (Tabla 1).

Las fuentes de contaminación evidentes en la ciudad se relacionan con el tránsito vehicular continuo, la creciente urbanización y la adecuación de vías de acceso; lo que trae consigo una reducción en el área de las zonas verdes, además de la tala indiscriminada de especies hospederas autóctonas del sector. Por ende, se observa una transición en el porte y la abundancia de la vegetación a medida que se pasa de la periferia al centro de la ciudad, dado que los sectores que colindan con la zona rural presentan una composición florística más diversa y con parches de vegetación agrupados; mientras que la

flora al interior de la ciudad está fragmentada y corresponde a árboles o arbustos ornamentales con pocas especies. Sin embargo, en esta evaluación se realizaron levantamientos sobre 100 forofitos (correspondientes a 11 especies diferentes).

Sobre dichos hospederos, fueron recolectadas 47 especies de plantas no vasculares, que corresponden a 30 líquenes, diez hepáticas y siete musgos (Tabla 2). Se establece que en cada estación los líquenes son el grupo más representativo y así mismo, la forma de crecimiento foliosa representa un 60 % de las especies líquénicas registradas, siendo la forma más frecuente, seguida de los líquenes fruticosos (17 %), gelatinosos (13 %) y costrosos (10 %). En términos de estructura, se observa que los líquenes ( $H' = 1,62$ ;  $D' = 0,31$ ) se distribuyen de manera más equitativa que los musgos ( $H' = 1,31$ ;  $D' = 0,33$ ) y hepáticas ( $H' = 1,32$ ;  $D' = 0,39$ ) en las estaciones de muestreo.

*Parmotrema austrosinense* es la especie líquénica más frecuente (18 estaciones) y la siguen *Heterodermia albicans* y *Punctelia* sp. (16); en cuanto a los briófitos *Frullania* sp. fue encontrada en ocho estaciones y *Bryum* sp. en seis, condición que permite catalogarlos como los más frecuentes. Respecto a la cobertura, *Heterodermia albicans* (83087 cm<sup>2</sup>) y *Punctelia* sp. (37855 cm<sup>2</sup>) son los líquenes más abundantes, mientras que como espe-

Tabla 2. Distribución e IPA (Índice de Pureza Atmosférica) de especies de plantas no vasculares registradas en la ciudad de Tunja (Ci = promedio de cobertura; Qi = índice de resistencia; Fi = número de forofitos en los que aparece la especie).

Especies	Ci	Qi	Fi	Fi/n	IPA	Estaciones	Ubicación*	Hábito
<i>Brachylenium</i> Schwägr	1	7	1	0,0106	0,0745	1	E10	toxófila
<i>Brachyolejeunea laxifolia</i> (Taylor) Schiff.	1	22	3	0,0319	0,7021	1	E1	sensible
<i>Oropogon</i> Th. Fr.	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1, E25	sensible
<i>Bryum</i> Hedw.	1,2353	6,7	7	0,0745	0,6176	7	E3, E6, E7, E8, E9, E11, E23	toxófila
<i>Bryum argenteum</i> Hedw.	1,0175	9	3	0,0319	0,2923	2	E6, E9	tolerante
<i>Calymperes</i> Sw. ex F. Weber	1,7	8,33	4	0,0426	0,6028	3	E2, E9, E22	tolerante
<i>Cheilolejeunea</i> (Spruce) Schiff.	1	11	1	0,0106	0,1170	1	E3, E25	tolerante
<i>Chrysotrix candelaris</i> (L.) J.R. Laundon	2,0293	7,8571	13	0,1383	2,2051	7	E3, E4, E11, E21, E22, E24, E25	tolerante
<i>Cololejeunea</i> (Spruce) Schiff.	1	7	1	0,0106	0,0745	1	E9	toxófila
<i>Cora pavonia</i> (Sw.) Fr.	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	sensible
<i>Everniastrum columbiense</i> (Zahlbr.) Hale ex Sipman	3,0943	11,8	15	0,1596	5,8265	5	E1, E2, E3, E20, E23	tolerante
<i>Flavopunctelia flaventior</i> (Stirt.) Hale	2,4831	5,66	50	0,5319	7,4757	15	E4, E5, E6, E10, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E25	toxófila
<i>Frullania</i> Raddi	2,9307	11,1429	18	0,1915	6,2533	7	E1, E2, E3, E6, E11, E23, E25	tolerante
<i>Frullania</i> Raddi	2	9	2	0,0213	0,3830	2	E11, E23	tolerante
<i>Heterodermia albicans</i> Swinscow & Krog.	2,9203	5,2	49	0,5213	7,9157	15	E5, E6, E7, E8, E9, E10, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E18, E21, E24	toxófila
<i>Heterodermia leucomela</i> (Pers.) Swinsc. & Krog	2,5408	8,4167	24	0,2553	5,4600	12	E1, E2, E3, E11, E13, E15, E16, E18, E20, E22, E23, E24	tolerante
<i>Heterodermia obscurata</i> (Nyl.) Trevis	1	11	1	0,0106	0,1170	1	E6	tolerante
<i>Heterodermia speciosa</i> (Wulfen) Trevis.	1	11	1	0,0106	0,1170	1	E6, E25	tolerante
<i>Hypotrachyna</i> (Vain.) Hale	2,5313	12,75	6	0,0638	2,0600	4	E1, E3, E11, E22	tolerante
<i>Hypotrachyna imbricatula</i> Zahlbr.	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	toxófila
<i>Jensenia</i> Lindb.	1	11	1	0,0106	0,1170	1	E2	tolerante

Continuación Tabla 2.

Especies	Ci	Qi	Fi	Fi/n	IPA	Estaciones	Ubicación*	Hábito
<i>Jubula</i> Dumort.	1	7	1	0,0106	0,0745	1	E9	sensible
<i>Lecanora</i> Ach.	1,1887	8,6	12	0,1277	1,3051	6	E1, E3, E4, E6, E16, E21	toxófila
<i>Leptogium azureum</i> (Sw. ex Ach.) Mont.	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	tolerante
<i>Leptogium corticola</i> (Taylor) Tuck.	1,1103	16,5	5	0,0532	0,9745	2	E1, E2	sensible
<i>Leptogium phyllocarpum</i> (Pers.) Mont.	1	22	2	0,0213	0,4681	1	E1	sensible
<i>Leptogium</i> (Ach.) Gray	1,9	16,5	2	0,0213	0,6670	2	E1, E2	sensible
<i>Lobariella pallida</i> (Hook. f.) Moncada & Lücking	1	22	3	0,0319	0,7021	1	E1	sensible
<i>Sematophyllum subsimplex</i> (Hedw.) Mitt.	1	9	1	0,0106	0,0957	1	E11	tolerante
<i>Metzgeria</i> Raddi.	1,3636	16,5	2	0,0213	0,4787	2	E1, E3	sensible
<i>Omphalanthus</i> Lindenb. & Nees	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	sensible
<i>Parmeliella</i> Müll. Arg.	1	22	3	0,0319	0,7021	2	E1	sensible
<i>Parmotrema austrosinense</i> (Zahlbr.) Hale	4,5181	6,0556	58	0,6170	16,8816	18	E2, E5, E6, E9, E10, E12, E13, E14, E15, E16, E17, E18, E19, E20, E21, E22, E23, E25	toxófila
<i>Parmotrema crinitum</i> (Ach.) M. Choisy	1	11	3	0,0319	0,3511	1	E2	tolerante
<i>Parmotrema rampoddense</i> (Nyl.) Hale	1	7	1	0,0106	0,0745	1	E4	toxófila
<i>Parmotrema stuppenum</i> (Taylor) Hale	3,2927	8,8	15	0,1596	4,6238	5	E3, E4, E11, E21, E23	tolerante
<i>Pottiaceae</i> Schimp.	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	sensible
<i>Porella complanata</i> (Stephani) Sw.	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	sensible
<i>Crocodia aurata</i> (Ach.) Link	1	11	3	0,0319	0,3511	1	E2	tolerante
<i>Pseudocyphellaria crocata</i> (L.) Vain.	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	sensible
<i>Ramalina celsa</i> (Spreng.) Krog & Swinscow	1,1680	7,2667	40	0,4255	3,6117	15	E2, E3, E4, E5, E6, E10, E11, E14, E15, E19, E20, E22, E23, E24, E25	toxófila
<i>Sticta</i> (Schreb.) Ach.	1	22	4	0,0426	0,9362	1	E1	sensible
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i> (L.) Norman ex Tuck.	1,8924	6	24	0,2553	2,8991	9	E5, E6, E10, E14, E15, E16, E17, E18, E20	toxófila
<i>Teloschistes exilis</i> (Michx.) Vain.	1,1813	7,4	18	0,1915	1,6740	10	E4, E5, E6, E10, E20, E21, E22, E23, E24, E25	tolerante
<i>Teloschistes flavicans</i> (Sw.) Norman	2,0833	5,6667	4	0,0426	0,5024	3	E13, E14, E22	toxófila
<i>Usnea</i> Dill. ex Adams	1,3283	9,3636	44	0,4681	5,8220	11	E1, E2, E3, E10, E11, E15, E20, E21, E22, E23, E25	tolerante
<i>Zelometeorium recurvifolium</i> (Hornsch.) Manuel	1	22	1	0,0106	0,2340	1	E1	sensible

\* La numeración (ID) de las estaciones se registra en la tabla 3.

cies raras se señalan a *Dictyonema glabratum* y algunas especies de *Heterodermia* que no superan los 20 cm<sup>2</sup>; en las hepáticas, *Cololejeunea* sp. (736 cm<sup>2</sup>) y *Frullania* subgen. *Meteoriopsis* (296 cm<sup>2</sup>) son organismos abundantes, mientras *Porella complanata* registra la menor cobertura con 4 cm<sup>2</sup>; para los musgos, domina *Zelometeorium recurvifolium* y como taxón menos representativo se identifica un ejemplar de *Pottiaceae* con 6 cm<sup>2</sup>. La Reserva Forestal Protectora (RFP) “El Malmo” presenta el mayor número de especies (23) en el muestreo, y de acuerdo con los valores de equidad y dominancia se señala como la estación más diversa ( $H' = 2,23$ ;  $D' = 0,14$ ), seguida por el Mirador Escandinavo ( $H' = 2,14$ ) y Ciudad Jardín ( $H' = 2,11$ ) que comparten el número de especies (12) y el valor de dominancia ( $D' = 0,14$ ). Por otra parte, el Parque Santander ( $H' = 0,52$ ;  $D' = 0,65$ ) y el Parque Semáforos ( $H' = 0,15$ ;  $D' = 0,93$ ) son los sitios de menor riqueza, con solo dos es-

pecies; pero presentan valores de diversidad más altos que el Sendero Ecológico ( $H' = 0,13$ ;  $D' = 0,94$ ), que alberga tres especies no vasculares en sus forofitos (Fig. 1). Se reconocen algunas especies propias de las estaciones RFP El “Malmo” y Ciudad Jardín (14 líquenes, seis hepáticas y cinco musgos); también en la zona centro de la ciudad, estaciones como el Parque Pinzón y el Parque Maldonado presentan especies que únicamente se registran en sus forofitos. La similitud en la composición florística de las estaciones, puede estar relacionada con factores bióticos como abióticos, relativos a las características propias del forofito, así como a la estructura arquitectónica y vial de la ciudad. Por lo cual, se observan diferentes agrupaciones como resultado del análisis clúster (Fig. 2), donde el primer grupo (G1) registra la mayor similitud, lo cual se debe a que sus estaciones comparten la totalidad de las especies; también se debe a la

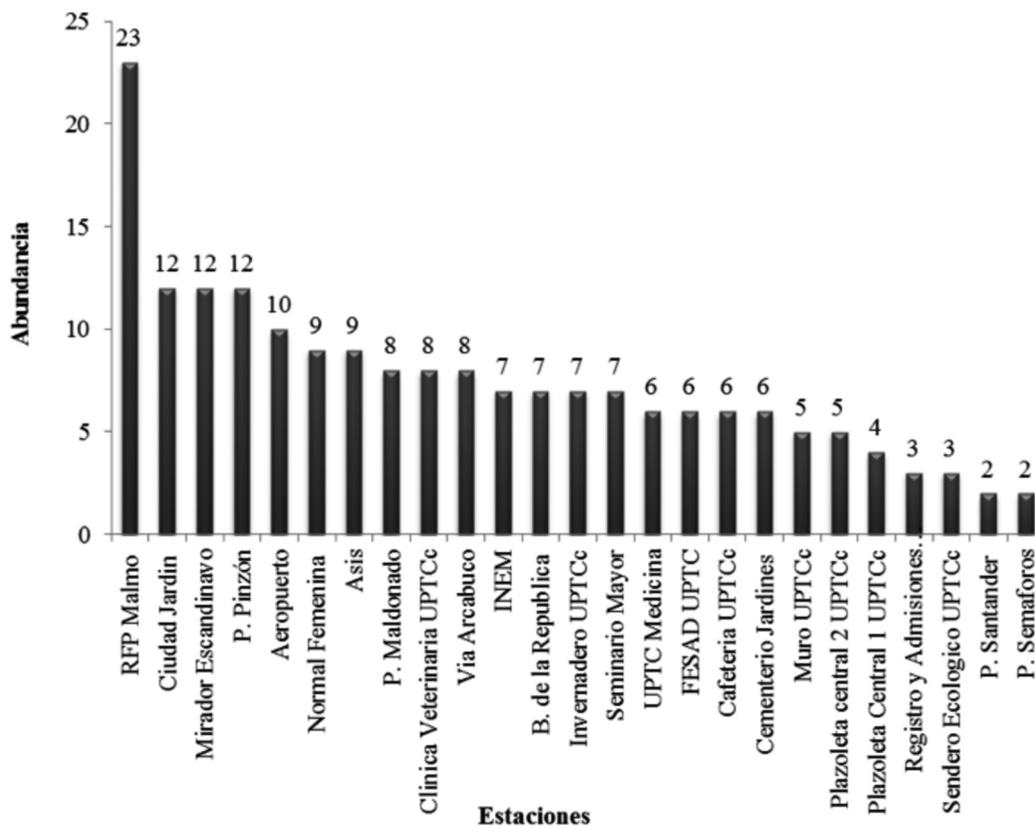


Figura 1. Abundancia de especies en las estaciones evaluadas.

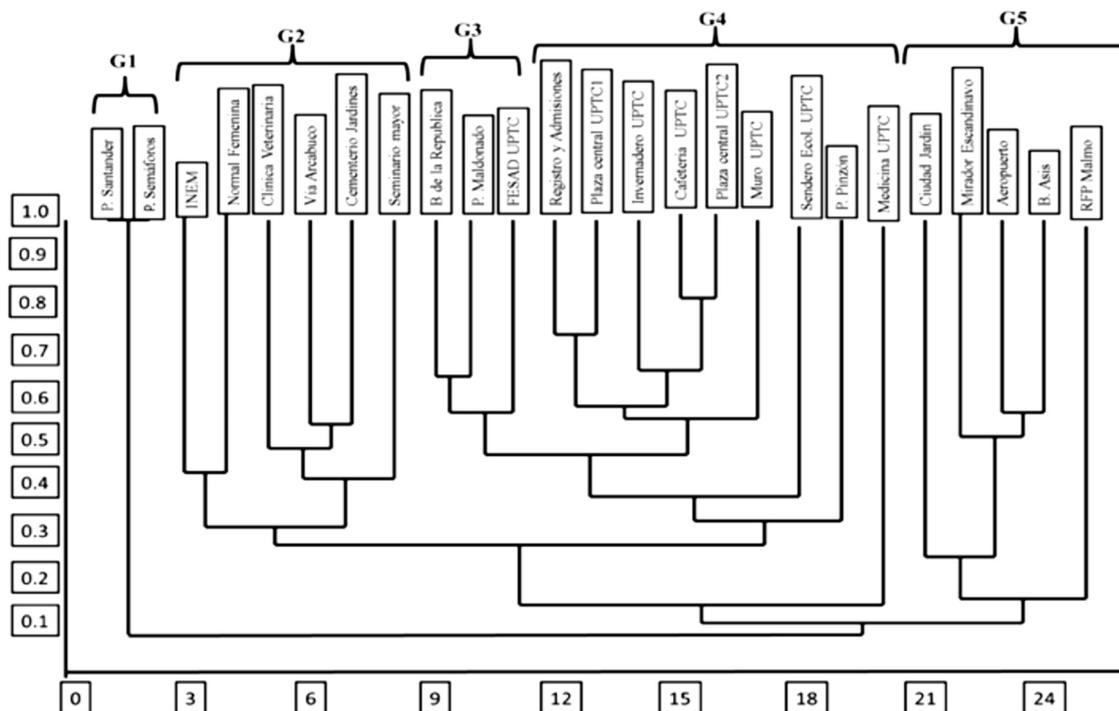


Figura 2. Agrupamiento por similitud de las estaciones de acuerdo a su composición florística.

ubicación de las estaciones en la ciudad, en un sector comercial del centro, y a la especie y características propias del forofito (superficie de la corteza).

El segundo grupo (G2) está representado por estaciones ubicadas hacia la periferia de las áreas urbanas y que colindan con el área rural. Algunas de sus estaciones comparten el tipo de vía y la altura de los edificios cercanos; no obstante, difieren en los forofitos y se observa un grupo aislado conformado por las instituciones educativas (INEM y Normal Femenina).

Otra de las agrupaciones que se observan está conformada por el Bosque de la República y el Parque Maldonado (G3), que comparten el tipo de vía y la clasificación de la zona, a las cuales se suma la estación de la FESAD, que no presenta condiciones similares, y tiene el 60 % de especies compartidas.

El cuarto grupo (G4) relaciona varias de las estaciones ubicadas en el campus de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), algunas comparten el tipo de vía y otras tienen en común a *Tecoma stans* como el forofito examinado, de igual modo la altura de los edificios es un factor común. Sin embargo, en este grupo, también se encuentra relacionada la estación del Parque Pinzón, que se ubica

al centro de la ciudad y pese a compartir características como la altura de los edificios y el tipo de vías, difiere en el árbol hospedero (*Acacia melanoxylon*).

El quinto grupo presenta la menor correlación y se establece como un bloque aislado, dado que las estaciones que conforman este grupo se ubican en área rural y la vegetación vascular es flora nativa y no ornamental; los forofitos escogidos se encuentran en bosques o cinturones de asteráceas y ericáceas, entre otros. En este grupo, RFP “El Malmo” corresponde a la estación más aislada.

Por otra parte, *Parmotrema austroinense* (16,88), *Heterodermia albicans* (7,91) y *Frullania* subgen. *Meteoriopsis* (6,25) registran altos valores en el IPA, los musgos presentan valores bajos a medios como *Bryum* sp. (0,61), *Zelometeorium recurvifolium* (0,23) y *Sematophyllum subsimplex* (0,09). Especies con valores bajos como *Cololejeunea* sp. (0,07) y *Parmotrema rampodense* (0,07), cuyos valores obedecen a la poca frecuencia dentro del muestreo.

La suma de los IPA de las especies presentes en cada estación, permite establecer los valores para cada una de las estaciones, dentro de las cuales se destacan: la Normal Femenina, Parque Pinzón e Invernadero UPTC por presentar

Tabla 3. Ubicación de las estaciones de muestreo en las zonas de isocontaminación establecidas.

ID	Estación de muestreo (coordenadas geográficas)	IPA	Zona de Isocontaminación
1	Parque Santander (5°32'9.73"N 73°21'45.62"O)	8,53	Máxima
2	Parque de Semáforos (5°32'12.27"N 73°21'41.41"O)	8,53	Máxima
3	Sendero Ecológico UPTCc (5°33'0.23"N 73°21'20.84"O)	27,97	Alta
4	UPTC, sede Medicina (5°32'6.07"N 73°21'24.92"O)	28,13	Alta
5	Colegio INEM CATP (5°31'30.40"N 73°22'10.63"O)	28,89	Alta
6	Aeropuerto (5°32'41.10"N 73°20'27.74"O)	30,04	Alta
7	Registro y Admisiones UPTCc (5°33'5.85"N 73°21'17.84"O)	32,27	Alta
8	Bosque Asís (5°34'49.70"N 73°20'42.90"O)	33,30	Alta
9	RFP Malmo (5°30'7.41"N 73°24'54"O)	34,03	Media
10	Plazoleta central 1 UPTCc (5°33'96"N 73°21'22.90"O)	35,17	Media
11	Mirador Escandinavo (5°31'20.24"N 73°22'26.79"O)	37,73	Media
12	Vía a Arcabuco-bomba Terpel (5°33'46"N 73°21'19.71"O)	38,21	Media
13	FESAD UPTC (5°33'8.78"N 73°21'26.69"O)	39,29	Media
14	Cementerio Jardines de la Asunción (5°34'59.92"N 73°20'2.33"O)	40,19	Media
15	Plazoleta central 2 UPTCc (5°33'6.30"N 73°21'25.15"O)	40,63	Baja
16	Bosque de la República (5°31'40.55"N 73°21'51"O)	41,08	Baja
17	Muro UPTCc (5°33'6.99"N 73°21'20.66"O)	41,13	Baja
18	Cafetería UPTCc (5°33'9.25"N 73°21'22.65"O)	41,94	Baja
19	Seminario Mayor (5°33'57.25"N 73°20'29.73"O)	44,00	Baja
20	Parque Maldonado (CULFISA), (5°32'35.51"N 73°21'30.47"O)	44,99	Baja
21	Ciudad Jardín (5°30'10.26"N 73°22'11.15"O)	45,49	Baja
22	Clínica Veterinaria UPTCc (5°33'14.37"N 73°21'43.59"O)	48,41	Baja
23	Invernadero UPTCc (5°33'11.06"N 73°21'24.62"O)	48,50	Baja
24	Parque Pinzón (5°32'9.93"N 73°21'33.02"O)	49,16	Baja
25	Normal Femenina (5°33'27.76"N 73°21'15.08"O)	52,22	Muy Baja

los valores más altos, que señalan a su vez baja contaminación; mientras los Parques Santander, Semáforos y el Sendero Ecológico de la UPTC sustentan los valores más bajos y se consideran las estaciones con mayor impacto de la contaminación atmosférica (Tabla 3).

Los valores IPA fueron agrupados en intervalos, así:

Contaminación máxima: IPA (> 8,53-19,41)

Contaminación alta: IPA (19,6-30,30)

Contaminación media: IPA (30,40-41,18)

Contaminación baja: IPA (41,20-52,06)

Contaminación muy baja: IPA (52,15-62,95)

Los rangos establecidos en la anterior categorización, permiten relacionar las estaciones en zonas de isocontaminación, y dibujarlas en un mapa de la ciudad en el que se reconoce de manera gráfica el impacto de la contaminación atmosférica en Tunja (Fig 3).

## DISCUSIÓN

Las plantas no vasculares son organismos útiles en el diagnóstico de impactos ambientales y han sido catalogados como indicadores de contaminación atmosférica muy efectivos gracias a sus múltiples respuestas, tanto en el campo fisiológico como en el comportamiento de sus comunidades (Santoni y Lijteroff, 2006); condición que permite señalar su uso como una metodología práctica y económica, que de acuerdo con Rubiano y Chaparro (2006) reduce costos respecto a los análisis fisicoquímicos. Este trabajo se reconoce como el primer aporte en cuanto a la determinación de niveles de contaminación atmosférica para la ciudad de Tunja a partir del uso de las plantas no vasculares como bioindicadores; en el cual se respalda una metodología práctica y económica, así como de resultados muy eficientes.

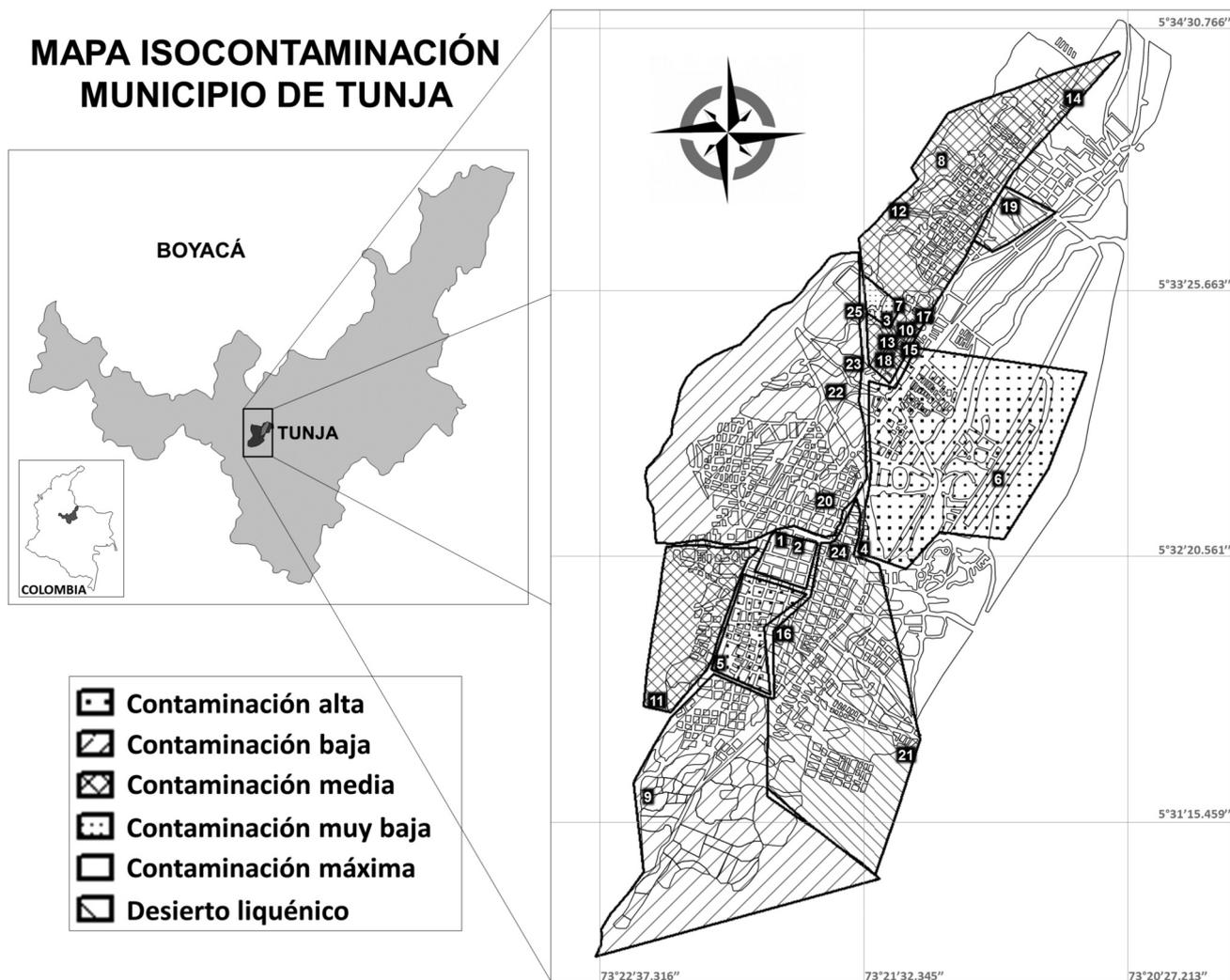


Figura 3. Mapa de isocontaminación de la ciudad de Tunja con la ubicación de las 25 estaciones de muestreo.

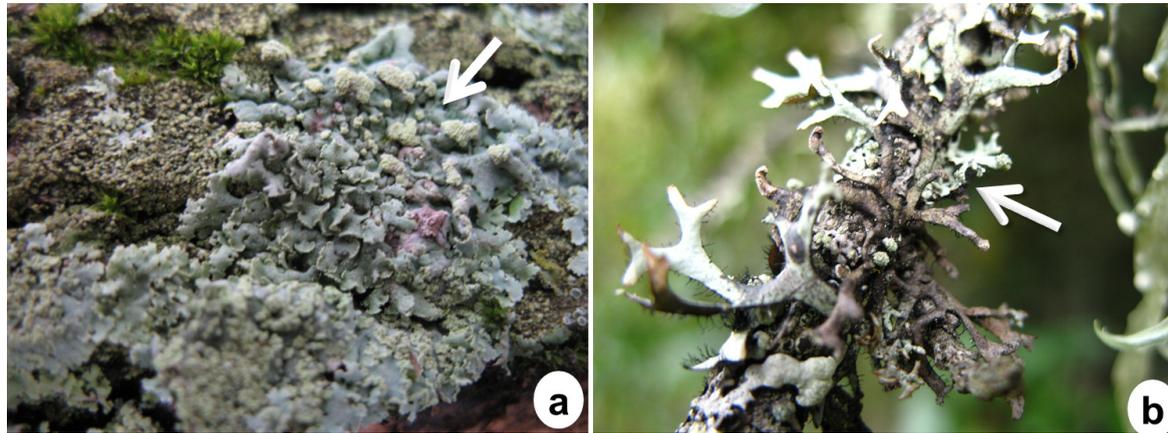


Figura 4. Respuestas fisiológicas de los talos liquénicos, a) necrosis en el talo de *Punctelia* sp., b) cambio de coloración en *Heterodermia albicans*.

Se observan respuestas fisiológicas como necrosis y cambios de coloración en la superficie de los talos liquénicos y las hojas de algunos briófitos, principalmente en ejemplares de *Bryum argenteum*, *Frullania* sp., *Heterodermia albicans*, *Punctelia* sp. y varias especies de *Parmotrema* (Fig. 4), que pese a reconocerse como especies frecuentes, presentan síntomas de acumulación de material particulado. Canseco *et al.* (2006), mencionan que estas respuestas son un claro indicio de contaminación atmosférica, dado que la tolerancia de las plantas no vasculares hacia los distintos contaminantes está determinada por la resistencia del protoplasma de la célula y la madurez de los talos o vástagos.

Según Canseco *et al.* (2006), en las ciudades, es posible observar seriaciones de especies y biotipos liquénicos de acuerdo al porcentaje de área verde o la intensidad del tráfico. En Tunja, se reconoce la abundancia del biotipo folioso para los líquenes; sin embargo, se observa que algunas especies son dominantes en determinada zona, lo que sugiere su tolerancia a determinados compuestos contaminantes. Es así como, a partir de la contribución de Medina (2002), se puede establecer que *Bryum* sp., *Heterodermia albicans*, *Parmotrema austrosimense* y *Punctelia* sp., son especies toxófilas, mientras *Bryum argenteum*, *Everniastrum columbiense*, *Parmotrema stupenum*, *Sematophyllum supsimplex* y *Usnea* sp. son tolerantes y *Pseudocyphellaria crocata*, *Sticta* sp., *Zelometeorium recurvifolium*, *Metzgeria* sp., que son de distribución restringida, se consideran especies sensibles. Lo anterior, se indica a partir del coeficiente de resistencia ( $Q_i$ ) y la cobertura registrada por cada organismo.

Se sugiere que algunas de las zonas evaluadas se encuentran bajo la influencia de la “acidez atmosférica”, evidente según Crespo *et al.* (1981) por la baja presencia de talos fruticosos, la presencia exuberante de especies acidófilas y la ausencia o baja representatividad de la familia Lobariaceae. Dichas observaciones son conspicuas en varios de los sectores evaluados y se registran en los Parques Santander y Semáforos, donde domina *Heterodermia albicans* y no se encontraron las formas

fruticosas; de igual manera se resalta que Lobariaceae es una especie, que solo está presente en dos estaciones de muestreo. Los coeficientes de diversidad y riqueza para las diferentes estaciones, revelan una disminución a medida que se pasa de la zona periférica hacia el centro de la ciudad; lo que puede estar relacionado con la composición florística de los parches de plantas vasculares, el tipo de forofitos escogidos para la evaluación, las corrientes de viento y las barreras que impiden la salida de los contaminantes atmosféricos.

Crespo *et al.* (1981), señalan que las estaciones resguardadas de las corrientes de viento pueden presentar mayor diversidad que las que se encuentran expuestas, y de acuerdo con Simijaca *et al.* (2011), los edificios y los corredores arborizados son un obstáculo efectivo para las corrientes de viento que transportan el material particulado, tal como se observa en las estaciones aledañas al campus universitario (UPTC) y las demás instituciones educativas (Tabla 1).

Pese a que la altura de los edificios detiene la circulación de corrientes de viento y en algunos casos favorece el establecimiento de epífitos sobre los hospederos, se observa que el sendero ecológico de la UPTC, tiene una riqueza muy baja (tres especies) y está determinada por la preferencia de forofitos. Simijaca *et al.* (2011) mencionan que determinados hospederos pueden albergar mayor cantidad de especies epífitas que otros, dado que árboles como *Acacia melanoxylon* secretan sustancias alelopáticas que restringen el establecimiento de briófitos y líquenes en su superficie, a diferencia de *Malus communis* y *Pittosporum undulatum* donde los epífitos crecen de manera exuberante.

Se identifica en este estudio que el análisis estadístico coincide en algunos casos con las zonas de isocontaminación (G1 y G5), motivo que permite establecer una estrecha relación entre la composición, diversidad florística y el comportamiento de los contaminantes (Crespo *et al.* (1981); Canseco *et al.*, 2006). Sin embargo, se observan sitios con altos valores de riqueza que no corresponden con los sectores menos

contaminados; tal es el caso de la estación RFP “El Malmo” que alberga 23 especies epífitas y se ubica en una zona de contaminación media, o la estación de la Normal Femenina, que con nueve taxones registrados en el sector menos contaminado. Esta última estación, agrupa especies de alta frecuencia y presenta una mezcla entre especies toxófilas y sensibles, que permiten evidenciar altos valores en el IPA.

Lo anterior, corresponde a una situación como consecuencia de las coberturas registradas en las especies toxófilas de dicha área, lo que resta importancia en el IPA a la riqueza de las especies sensibles. Teniendo en cuenta lo mencionado, pueden aplicarse correcciones a través de variaciones a la fórmula, como lo sugieren Kaffer *et al.* (2011), donde se tiene en cuenta la escala de cobertura de las formas de crecimiento o las escalas espaciales que mencionan Giordani *et al.* (2013); pues al reducir la escala de los polígonos establecidos puede sugerirse que la estación RFP “el Malmo” corresponde a una estación con baja contaminación, pero que se encuentra inmersa en un área con mayor incidencia de los contaminantes atmosféricos.

En el estudio realizado por Rubiano y Chaparro (2006) para la Universidad Nacional Colombia (en Bogotá), se registran coincidencias con esta investigación, en cuanto a la representatividad y toxofilia de especies como *Flavopunctelia flaventior*, *Heterodermia albicans* y *Parmotrema austrosinense*, de igual forma se observa que las zonas de alta contaminación se ubican en el centro del área evaluada como ocurre en la ciudad de Tunja. Las indagaciones de Segura (2013), para la ciudad de Quito (Ecuador) también señalan la familia Parmeliaceae como una de familias más frecuentes. Pero se registra un patrón de isocontaminación, en el cual, las zonas centrales de la ciudad presentan mejor calidad de aire. Lo cual, puede atribuirse a las diferencias en el flujo vehicular y la planeación del territorio en estas dos ciudades, pues para Quito se indica la presencia de parques arborizados hacia el centro de la ciudad, que disminuyen los efectos de la polución.

## CONCLUSIONES

La ciudad de Tunja presenta seis zonas principales de isocontaminación, desde contaminación máxima con 8,53 de IPA, hasta mínima con 52,2196 de IPA y desiertos liquénicos en algunos sectores. Dichas zonas de isocontaminación se distribuyen de manera continua y muestran un patrón donde la contaminación aumenta hacia el centro de la ciudad y disminuye hacia las zonas rurales y periféricas.

Finalmente, Tunja es considerada una ciudad capital intermedia, la cual está en proceso de crecimiento urbanístico, debido a la ubicación geográfica, calidad de vida en sentido de seguridad, acceso a zonas turísticas e históricas, así como, un punto de conexión entre la capital del país y el nororiente colombiano, lo cual, es atractivo para visitantes y residentes. No obstante, es indispensable desarrollar programas donde se mejoren las condiciones de calidad del aire, con la ampliación de zonas verdes para garantizar áreas de aire más lim-

pio, mediante el desarrollo de programas de monitoreo, como el aquí presentado, que evalúen la calidad del aire.

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, especialmente a la dirección de investigaciones (DIN) por la financiación del proyecto; al grupo Sistemática Biológica (SisBio) y al Herbario UPTC; a Bibiana Moncada de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; a los biólogos Jorge Gil, Stefanny Porras y Pablo Gil-L. del grupo SisBio del Herbario UPTC, y a Fabián Simijaca.

## BIBLIOGRAFÍA

- Canseco A, Anze R, Franken M. Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Acta Nova*. 2006;3(2):286-307.
- Chaparro M, Aguirre J. Hongos liquenizados. Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C. 2002. p. 220.
- Chaves JL. Informes del inventario nacional de biodiversidad, Líquenes de la región ecológica Talamanca. Programa conjunto Instituto Nacional de Biodiversidad – Sistema Nacional de Áreas de Conservación. 2005. p. 21.
- Churchill S, Linares E. *Prodromus Briologae Novo-Granatensis*. Introducción a la flora de musgos de Colombia. Biblioteca José Jerónimo Triana. 12. Parte 1. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 1995. p. 924.
- CONCEJO MUNICIPAL DE TUNJA. Plan de ordenamiento territorial. Acuerdo Municipal N.º 0014. 2007. p. 201.
- Crespo A, Barreno E, Sancho LG, Bueno AO. Establecimiento de una red de valoración de pureza atmosférica en la provincia de La Coruña (España) mediante bioindicadores liquénicos. *Lezama*. 1981;3:289-311.
- Crespo A, Manrique E, Barreno E, Serriña E. Valoración de la contaminación atmosférica del área urbana de Madrid mediante bioindicadores (líquenes epífitos). *An Inst Bot Cavanilles*. 1977;34(1):71-94.
- Giordani P, Brunialti G, Frati L, Incerti G, Ianesch L, Vallone E, Bacaro G, Maccherini S. Spatial scales of variation in lichens: implications for sampling design in biomonitoring surveys. *Environ Monit Assess*. 2013;185(2):1567-1576. DOI: 10.1007/s10661-012-2651-8.
- Gómez H, Fernández R, Benzo Z, Galarraga F, Hernández J, Roschman-González A. Líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) - revisión - *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 2013;28(1):45-58.
- Hammer O, Harper D, Ryan P. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontología Electrónica*. 2001;4(1):1-9.
- Hawksworth DL, Iturriaga TY, Crespo A. Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio ambientales en los trópicos. *Rev Iberoam Micol*.

- 2005;22(2):71-82. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1130-1406\(05\)70013-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1130-1406(05)70013-9).
- Iwatsuki Z. The epiphytic briophyte communities in Japan. *J Hattori Bot Lab.* 1960; 22:159-339.
- Kaffer M, Martins S, Alves C, Pereira V, Fachel J, Vargas V. Corticolous lichens as environmental indicators in urban areas in southern Brazil. *Ecol Indic.* 2011;11(5):1319-1332. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.006>
- Leblanc F, De Sloover J. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Can J. Bot.* 1970;48(8):1485-1469. DOI: 10.1139/b70-224
- Medina M. Utilización de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en Sogamoso-Boyacá. Trabajo de Grado, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Facultad de Ciencias Básicas, Escuela de Ciencias Biológicas. 2002. p. 108.
- Méndez VH, Monge, J. El uso de líquenes como biomonitores para evaluar el estado de la contaminación atmosférica a nivel mundial. *Biocenosis.* 2011;25(1-2):51-67.
- Nash T, Whirt W. Lichens, bryophytes and air quality- *Bibliotheca Lichenologica.* J. Cramer. Berlin. Stuttgart. 1988. p. 297.
- Rubiano LJ. Delimitación de áreas de isocontaminación en Cali y Medellín utilizando líquenes como bioindicadores. Pérez Arbelaezia. 1987;1(4):7-41.
- Rubiano L, Chaparro M. Delimitación de áreas de isocontaminación atmosférica en el campus de la Universidad Nacional de Colombia mediante el análisis de bioindicadores (líquenes epífitos). *Acta biol. Colomb.* 2006;11(2):82-102.
- Santoni C, Lijteroff R. Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de bioindicadores en la provincia de San Luís (Argentina). *Rev Int Contam Ambie.* 2006;22(1):49-58.
- Seed L, Wolseley P, Gosling L, Davies L, Power S. Modelling relationships between lichen bioindicators, air quality and climate on a national scale: Results from the UK-OPAL air survey. *Enviro Pollut.* 2013;148:437-447 Doi: 10.1016/j.envpol.2013.07.045
- Segura S, Caracterización de la contaminación atmosférica en seis parques recreacionales del distrito metropolitano de Quito mediante el uso de bioindicadores. Trabajo de grado en Ingeniería Ambiental. Universidad Central Del Ecuador, Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental Carrera de Ingeniería Ambiental, 2013. p. 107.
- Simijaca D, Morales-P ME, Díaz-P CN. Líquenes y contaminación atmosférica en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Tunja). *Rev. Cienc. Desarrol.* 2011;3(2):69-89.
- Uribe J, Aguirre J. Clave para los géneros de hepáticas de Colombia. *Caldasia.* 1997;19(1-2):13-27.

