



## Líquenes como bioindicadores de la calidad de aire en el área urbana de Cochabamba

### Lichens as air quality bioindicators in Cochabamba's urban area

ABIGAIL ARANIBAR<sup>1,2</sup>, CAROLINA CLAROS<sup>1,2</sup>, CRISTIAN ZUBIETA<sup>1,3</sup>, & ERIKA FERNANDEZ<sup>4\*</sup>

<sup>1</sup> Carrera y Departamento de Biología, FCyT, Universidad Mayor de San Simón, Calle Sucre Frente Parque la Torre. Cochabamba, Bolivia.

<sup>2</sup> Unidad de Limnología y Recursos Acuáticos (ULRA), Departamento de Biología, FCyT, Universidad Mayor de San Simón, Calle Sucre Frente Parque la Torre. Cochabamba, Bolivia.

<sup>3</sup> Laboratorio de Entomología Médica, Dpto. de Biología, FCyT, Universidad Mayor de San Simón, Calle Sucre Frente Parque la Torre. Cochabamba, Bolivia.

<sup>4</sup> Postgrado de la Escuela Militar de Ingeniería EMI. Cochabamba, Bolivia.

\* E-mail: [erika.fer2003@gmail.com](mailto:erika.fer2003@gmail.com)

Recibido 28 V 2024. Aprobado 27 VII 2025.

#### RESUMEN

Los líquenes presentan sensibilidad a la contaminación atmosférica en diferentes grados, característica por la cual son ampliamente usados como bioindicadores de la calidad del aire de las áreas que habitan. El objetivo del trabajo fue determinar el nivel de contaminación atmosférica del área urbana de la ciudad de Cochabamba. Para el monitoreo de las comunidades liquénicas, se seleccionaron 12 estaciones de muestreo de acuerdo con la norma VDI 3957; el monitoreo se realizó durante la época seca y lluviosa del año 2023. Para determinar el grado de contaminación de cada estación se determinó el Índice de Pureza Atmosférica (IPA), que considera la frecuencia, cobertura y abundancia de nueve especies de líquenes. Las especies registradas, mostraron variaciones en factor de tolerancia a la contaminación, destacándose *Teloschistes chrysophthalmus* como la especie de mayor sensibilidad en ambas épocas, seguida de *Xanthoria parietina* y *Physciella* sp., respectivamente. Los resultados muestran diferencias en la calidad del aire según la cercanía a áreas verdes y sectores con alto tráfico vehicular, revelando una considerable tendencia general de IPA, mayor en la época lluviosa. El monitoreo realizado a partir del IPA ha reflejado la calidad del aire y su relación con las características urbanas de las estaciones de muestreo.

**Palabras clave:** Comunidad liquénica, contaminación atmosférica, factores microambientales, pureza atmosférica, monitoreo.

#### ABSTRACT

Lichens are sensitive to atmospheric pollution to different degrees, which is why they are widely used as bioindicators of air quality in which they live. The objective was to determine the level of atmospheric pollution in the urban area of the city of Cochabamba. For the monitoring of the lichen communities, 12 sampling stations were selected according to the VDI 3957 standard; the monitoring was carried out during the dry and rainy seasons of the year 2023. To determine the degree of contamination of each station, the Atmospheric Purity Index (API) was determined, which considers the frequency, coverage and abundance of nine lichen species. The species recorded showed variations in the pollution tolerance factor, with *Teloschistes chrysophthalmus* standing out as the most sensitive species in both seasons, followed by *Xanthoria parietina* and *Physciella* sp., respectively. The results show differences in air quality according to the proximity to green areas and sectors with high vehicular traffic, revealing a considerable general trend of API, higher in the rainy season. The monitoring carried out from the API has reflected the air quality and its relationship with the urban characteristics of the sampling stations.

**Key words:** Atmospheric pollution, atmospheric purity, lichen community, microenvironmental factors, monitoring.

## INTRODUCCIÓN

Los líquenes son también conocidos como hongos liquenizados, una asociación simbiótica y armoniosa entre las algas (fotobionte ó ficobionte), que están encargadas de la nutrición a partir de la fotosíntesis, y un hongo (micobionte). Esta asociación resulta en una estructura firme o rígida (talo), con forma diferente a sus componentes originarios, es decir, una nueva entidad morfológica y taxonómica (Nash, 1996). La sensibilidad de los líquenes a los contaminantes atmosféricos está estrechamente relacionada con su biología, debido a su capacidad “única” de absorber y acumular sustancias directamente del ambiente, como agua, nutrientes, gases y contaminantes atmosféricos (Estrada & Nájera, 2011). Entre algunas características particulares, son perennes y, a diferencia de las plantas vasculares, no tienen partes caducas, por lo que acumulan contaminantes como el dióxido de azufre (un subproducto de los combustibles fósiles), dióxido de carbono, ácidos sulfúrico y nítrico (componentes de la lluvia ácida), los fluoruros, el ozono, los hidrocarburos y algunos metales como el cobre, el plomo y el zinc (Brodo *et al.*, 2001; Van Herk 2001).

Los líquenes tienen diferentes grados de sensibilidad a los cambios en la atmósfera y a contaminantes específicos, por lo que desempeñan un papel fundamental como indicadores biológicos de la calidad del aire (Pescott *et al.*, 2015). Debido a que los organismos epífitos obtienen la mayor parte de los nutrientes a partir de la atmósfera (Lijteroff *et al.*, 2009), los líquenes son altamente receptivos a la variación de las condiciones o factores atmosféricos; lo que los convierte en organismos ideales para el monitoreo ambiental (Hawksworth *et al.*, 2005). Cumplen el rol de bioindicadores en dos niveles: 1) un grupo de especies altamente sensible a la contaminación, como el caso de *Evernia prunastri* (L.) Ach. sensible a ozono, 2) un grupo que son altamente resistentes a la contaminación y son capaces de acumular sustancias tóxicas, siendo estas las especies que pueden utilizarse para el monitoreo ambiental, como es el caso de *Cladonia foliacea* (Huds.) Willd., que acumula altas cantidades de compuestos nitrogenados (Thakur *et al.*, 2023).

Los líquenes, así mismo desempeñan múltiples funciones ecosistémicas, como la descomposición de rocas, formación de suelo, fijación de carbono y nitrógeno, son también consideradas como especies pioneras y sustentan la diversidad de numerosos organismos vivos al proporcionar alimento, hábitat, refugio, camuflaje y material para anidación (Zedda & Rambold, 2015; Illana-Esteban, 2009). Son reconocidos como productores primarios de los ecosistemas; además, algunos animales del sector norte del continente americano, como el alce, ciervo, cabra, gacela, buey almizclero, oso polar, ardilla y marmota, pueden incluir líquenes como complemento de su dieta (Seaward, 2008; Zuñiga-González *et al.*, 2021)

Por otra parte, los líquenes, registran diversos usos y beneficios para la sociedad, y ofrecen numerosos servicios ecosistémicos, como promover la formación del suelo y la creación de micro-hábitats para otros organismos (Heredia-Abarca, 2020). Se utilizan en la medicina tradicional, en la industria farmacéutica, para la decoración y en rituales étnicos, con aplicaciones que van desde el tratamiento de afecciones hasta el uso en perfumería (Barreno & Pérez-Ortega, 2003; Illana-Esteban, 2009; Devkota *et al.*, 2017). Han sido consumidos por humanos y animales en distintas culturas, como en Asia y América donde las especies *Umbilicaria esculenta* (Miyashi) Minks y *Bryoria fremontii* (Tuck.) Brodo & D. Hawksw., se utilizan en la gastronomía (Huereca-Delgado *et al.*, 2018). Además, históricamente los líquenes de los géneros *Alectoria* Ach., y *Bryoria* Brodo & D. Hawksw, fueron empleados como tintes en la industria textil, aunque su uso ha disminuido con el tiempo (Zuñiga-González *et al.*, 2021).

Los estudios más antiguos que emplean a líquenes como bioindicadores y/o biomonitoros, para la evaluación de la contaminación, provienen del siglo XIX (Nylander, 1866). Durante la última década, estas metodologías, han demostrado ser una alternativa eficiente y lo suficientemente precisa para identificar el grado de contaminación (Abas, 2021). Estas metodologías, se destacan por ser sencillas, de bajo costo y ambientalmente sostenibles, una de ellas ampliamente usada y adaptada es el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) descrita por LeBlanc & De Sloover (1970). Los valores IPA altos indicarán, buena calidad del aire y la presencia de especies más sensibles a la contaminación. Mientras que valores IPA bajos reflejarán una baja calidad del aire y, por consiguiente, la ausencia de especies sensibles.

Consecuentemente, se han llevado a cabo numerosas investigaciones usando a los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire. Entre los países sudamericanos destacan Brasil, Argentina y Ecuador (Abas, 2021). En Bolivia, desde hace poco más de 30 años se iniciaron las primeras investigaciones y gradualmente fueron tornándose más relevantes. En La Paz, autores como Anze (1993, 1996), Canseco (2004), Canseco *et al.* (2006) y Anze *et al.* (2007) realizaron estudios usando líquenes como bioindicadores de la calidad de aire. Del mismo modo, en Cochabamba se registran los estudios por Canaza (2008) y González *et al.* (2016). Más allá, en Tarija el trabajo de Oller (2017), que combinó el biomonitoring activo con las especies

*Vicia faba* L. y *Raphanus sativus* L., al igual que el biomonitoring pasivo con líquenes. No se conocen otros estudios relacionados en el resto del país.

Entre los años 2019 y 2021 según el Ministerio de Medio Ambiente y Agua (2021), en el informe del Programa Nacional de Gestión de Calidad del Aire (PNGCA), a través del Sistema Nacional de Información Ambiental (SNIA), la ciudad de Cochabamba presenta promedios anuales del Índice de Calidad Atmosférica que oscilan entre malos y extremadamente malos. De igual manera en ese mismo reporte, se registró que los promedios anuales de concentración de PM10 sobrepasan en varios casos los niveles guía establecidos por la OMS (15 µg/m<sup>3</sup> para el promedio anual y 45 µg/m<sup>3</sup> para el promedio de 24 horas), especialmente durante la temporada seca; esto implica un riesgo inminente para la salud de la población. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba, mediante la aplicación del Índice de Pureza Atmosférica (IPA), que permite determinar el grado de contaminación de una zona a partir del monitoreo de líquenes.

### Área de estudio

El área de estudio se encuentra en la ciudad de Cochabamba, ubicada en la provincia Cercado del departamento de Cochabamba: 17°23'37"S, 66°09'25"O (Figura 1A). Por su ubicación en el Valle Central posee una orografía particular, limitando al Norte con la Cordillera del Tunari, al Oeste con la Cordillera de Mazo Cruza, al Este con el Cerro San Pedro que divide con el Valle de Sacaba y al Sur con cerros que limitan el Valle de Santivañez. Estas serranías y cordilleras condicionan la concentración de contaminantes, polvo y humo. Los vientos son secos y suelen ser más fuertes durante las tardes y aún más intensos durante los meses de julio y agosto.

Biogeográficamente, la ciudad de Cochabamba pertenece a la provincia Boliviano-Tucumana, Sector del Río Grande-Piray, piso bioclimático Mesotropical correspondiendo al piso ecológico Montano. Tiene un bioclima xérico con un ombrotípico semiárido (por debajo de 2800 m). Entre las limitantes ecológicas se puede mencionar a la estacionalidad caracterizada por una época de lluvias significativa de diciembre a febrero, que coincide con la época más cálida del año. La época seca es de siete meses, comprendiendo la mayor parte del año, con una notoria sequía que abarca varios meses, especialmente durante el periodo más frío, de junio a agosto (Navarro et al., 2015).

En la ciudad prácticamente no quedan bosques remanentes, han sido reemplazados por una flora urbana bastante diversa, caracterizada por su alta riqueza con árboles, arbustos, herbáceas y suculentas; la mayoría ornamentales. Entre las especies nativas se resalta la presencia del jacarandá - *Jacaranda mimosifolia* D. Don, molle - *Schinus areira* L., tipa - *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze, chillijchi - *Erythrina falcata* Benth., *Erythrina poeppigiana* (Walp.) O.F. Cook, sauce - *Salix humboldtiana* Wild., tara - *Tara spinosa* (Molina) Britton & Rose), pacay - *Inga yngá* (Vell.) J.W. Moore, entre otros. Las especies introducidas por su valor estético y ornamental actualmente forman parte importante del nuevo paisaje de la flora urbana, se mencionan a grevillea - *Grevillea robusta* A. Cunn. ex R. Br., fresno - *Fraxinus americana* L., *Senna spectabilis* (DC.) H.S. Irwin & Barneby, *Ligustrum lucidum* W.T. Aiton, gomero - *Ficus elastica* Roxb. ex Hornem., brachichito - *Brachychiton populneus* (Schott & Endl.) R. Br., falso laurel o rosa palo - *Nerium oleander* L., olivo - *Olea europaea* L., paraíso - *Melia azedarach* L.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Muestreo

Los muestreos, en época lluviosa y seca, se realizaron en enero y agosto del 2023 respectivamente. Para ambos, se establecieron dos transectos Norte-Sur y Este-Oeste dentro del área de estudio.

Para la selección de las 12 estaciones de muestreo (Figura 1B, Tabla 1) y su evaluación, se consideró el cumplimiento de los siguientes criterios:

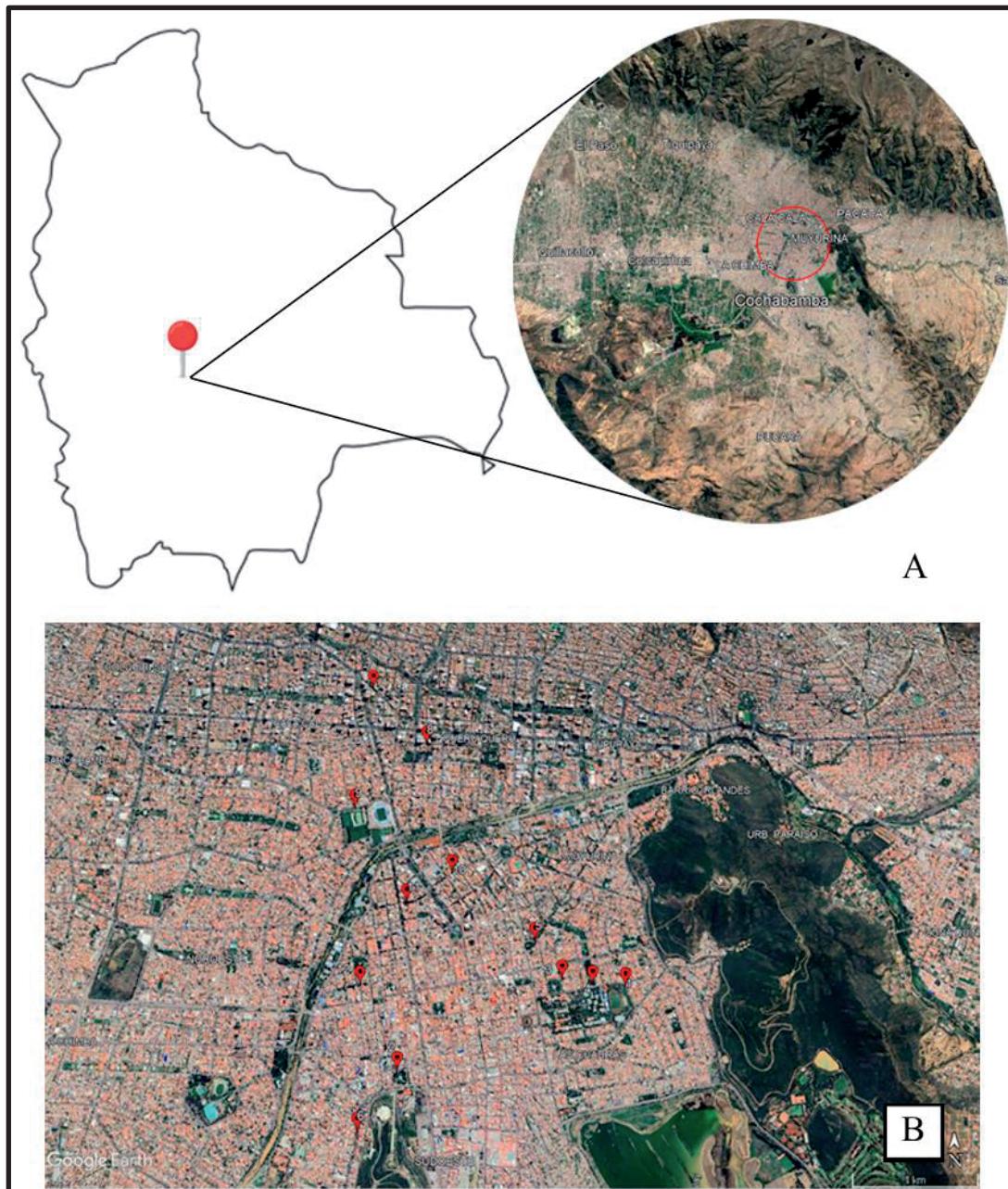
- Presencia de forófitos que cumplen con la norma VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 3957 (2003) que considera los criterios para el relevamiento de líquenes, detallado posteriormente.
- Establecimiento de un transecto, determinado por la principal vía de tráfico vehicular.
- Tipificación de las actividades que se desarrollan en la zona: comercial, residencial o industrial.

### Selección de los árboles portadores de comunidades de líquenes

*Criterios para la selección de los forófitos:* En base a lo establecido por Steubing & Fangmeier (1992), la colonización de la comunidad de líquenes en los forófitos se relaciona con: la edad del árbol, la estructura de

su corteza y el valor de su pH. Según la norma VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 3957 (2003), se consideraron forófitos con corteza rugosa y libre de pinturas o cualquier otro daño, adultos con un DAP  $\geq 50$  centímetros y una altura  $>$  a 1,50 m, de cortezas con pH similar (de preferencia neutro) para evitar el establecimiento de comunidades diferentes.

Durante el muestreo se realizó la identificación preliminar de los forófitos, la cual fue corroborada en gabinete con bibliografía especializada, como la “Flora ornamental urbana de Cochabamba” (Mercado *et al.*, 2019) y la “Guía de árboles y arbustos del Campus: Las Cuadras” (Fernández *et al.*, 2016). La correcta escritura de cada especie fue revisada en el Catálogo de plantas vasculares de Bolivia (Jørgensen *et al.*, 2014) y Tropicos ([tropicos.org](http://tropicos.org)).



**FIGURA 1.** Área de estudio. A) Ubicación en la zona central de la provincia Cercado del departamento de Cochabamba, Bolivia. B) Estaciones de muestreo. Fuente: Elaborado en base a Google Earth (2024)

**Determinación del pH de las cortezas:** Para seleccionar los forófitos de cada estación de muestreo, se obtuvieron los valores de pH de 14 especies de árboles. Se realizó un reconocimiento de campo previo en el que se colectaron fragmentos de corteza de cada especie de árbol. Inicialmente, con una navaja se extrajeron muestras de cortezas limpias, es decir, libres de pinturas, suciedad, líquenes, musgos o cualquier agente que pudiese influir en el pH.

**Tabla 1:** Ubicación y descripción de las estaciones de muestreo.

NO	ESTACIÓN DE MUESTREO	COORDENADAS		TIPO DE ZONA	TIPO DE VÍA
		LONGITUD	LATITUD		
1	Av. Belzu/ Av. Heroínas y Sucre	17°23'30" S	66°08'33" W	Residencial	Avenida
2	Plaza Esteban Arce	17°23'54,6" S	66°09'35 W	Plaza	Avenida
3	Calle Sucre (Frente al parque La Torre)	17°23'30" S	66°08'51" W	Residencial	Calle
4	Plaza Sucre	17°23'30" S	66°08'51" W	Plaza	Calle
5	Av. Aniceto Arce/ Pasteur y Colombia	17°23'32" S	66°08'41" W	Comercial	Avenida
6	Av. Aroma (Coronilla)	17°23'19,8"S	66°08'58" W	Comercial	Avenida
7	Calle Juan Huallparimachi/ Tupac Amaru y Plz. L.F. Guzmán	17°24'7,3" S	66°09'47,1" W	Residencial	Calle
8	Calle Buenos Aires/ Av. Gualberto Villarroel y Trinidad	17°22'11" S	66°09'43" W	Residencial	Calle
9	Av. Juan de La Rosa/ Julio Méndez y Néstor Galindo	17°22'42,9"S	66°09'47" W	Comercial	Avenida
10	Calle La Paz/ Antezana y	17°23'3,9" S	66°09'25" W	Residencial	Calle
11	Calle La Paz/ Av. Ayacucho y Baptista	17°23'9,5" S	66°09'34,5 W	Comercial	Calle
12	Calle Colombia/ Tumusla y Falsuri	17°23'32" S	66°09'48,9" W	Comercial	Calle

El procesamiento se realizó en el Laboratorio de Microbiología del Departamento de Biología de la UMSS y consistió en la trituración de las cortezas con ayuda de un mortero y el producto resultante se depositó en un vaso de precipitado de 200 ml con agua destilada, garantizando que el pH del agua no influya en el resultado final. Por último, la solución final fue medida con un pHímetro.

*Identificación de las especies de líquenes:* La identificación taxonómica se realizó en gabinete, basándose en la observación de caracteres morfológicos según lo propuesto por Wirth *et al.* (2004) y Huereca-Delgado *et al.* (2018); siguiendo métodos tradicionales. Se consideraron la consistencia y aspecto del cuerpo o talo, el tipo de organización (crustáceos, foliáceos o fruticulosos), las estructuras de fijación (rizinas, cilios o pseudocifelas), las estructuras de multiplicación vegetativa (soralios, soredios o isidios) y por último, la presencia de peritecios o apotecios (tamaño, forma, margen y posición en el talo). Se empleó bibliografía especializada como la “Guía de Campo de los Líquenes, Musgos y Hepáticas” (Wirth *et al.*, 2004). Una Introducción al Estudio de los Líquenes de Bolivia (Morales *et al.*, 2009) y la clave para la identificación de los géneros de fotobiontes (Barreno & Pérez-Ortega, 2003). El nombre de todas las especies fue corroborado según lo establecido por GBIF (2024).

*Índice de pureza atmosférica:* En cada forófito seleccionado, se siguió la metodología conocida como “Cartografía de líquenes” propuesta por la Norma VDI (Verein Deutscher Ingenieure) 3957 (2003), la cual emplea una rejilla de relevamiento de líquenes de 10 cuadrados, cada uno de 10 × 10 cm<sup>2</sup>. La rejilla fue posicionada a la altura de 1,50 cm en los forófitos seleccionados para la toma de datos.

La fórmula sugerida por LeBlanc (1970) propuesta para el cálculo del índice de pureza atmosférica ha sido ampliamente usada y adaptada en diferentes ocasiones. Para el presente trabajo se empleó la fórmula adaptada por Steubing & Fangmeier (1992), que considera un diferente número de forófitos por cada estación de muestreo:

$$IPA_j = \frac{1}{n} \sum (f_i * Q_i) \text{ donde:}$$

IPA<sub>j</sub> = Índice de Pureza atmosférica de la estación j

n = número de forófitos muestreados en cada estación

f<sub>i</sub> = grado de frecuencia (número de cuadrados en los que una especie en estudio se presenta), más el grado de cobertura (porcentaje de dicha especie en la superficie cubierta), más el número de forófitos en los cuales está presente la especie

Por su parte, Q<sub>i</sub> definido como el factor de tolerancia de la especie i, se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$Q_i = \sum j \frac{(A_j - 1)}{N_j} \text{ donde:}$$

A<sub>j</sub> = número de especies presentes en la estación j, donde se encuentre la especie i.

N<sub>j</sub> = número de estaciones donde se encuentra la especie i.

Un mayor valor de Qi indicará que la especie es más sensible a la contaminación, mientras que un valor bajo de Qi indicará que la especie es más tolerante y por ende, menos sensible a la contaminación.

A partir de los IPA obtenidos en cada estación de muestreo, se establecieron los rangos para la determinación de los diferentes grados de contaminación de cada estación, para ello se usó la metodología propuesta por García & Rubiano (1984), la cual relaciona el IPA Máximo Teórico sobre el IPA Máximo Observado.

$$IPA \text{ máximo teórico} = S^2 - S \text{ donde:}$$

$S$  = número total de especies de líquenes monitoreados

$$\text{Cociente de relación} = \frac{IPA \text{ máximo teórico}}{IPA \text{ máximo observado}}$$

A partir del cociente de relación se realizó la agrupación de los rangos y su respectiva clasificación de nivel de contaminación (Tabla 2).

**Tabla 2:** Rangos de IPA para la clasificación de estaciones de muestreo. Propuesto por García & Rubiano (1984)

NIVEL	RANGO	CLASIFICACIÓN
I	0 -	Contaminación muy alta
II	-	Contaminación alta
III	-	Contaminación media
IV	-	Contaminación leve
V	- IPA máximo observado	Sin contaminación

## RESULTADOS

Estos datos fueron analizados estadísticamente (PAST 4.16c) y, al no cumplir con la normalidad de residuos (Shapiro wilk;  $p=7,005E-19$ ) fueron sometidos a la prueba de Kruskal–Wallis ( $p=0,01376$ ); se mantuvieron a las especies que no presentaron diferencias significativas en valores de pH. Posterior a un segundo análisis de corroboración (Kruskal–Wallis;  $p=0,1821$ ), se realizó el monitoreo de líquenes en 12 especies de forófitos que cumplieron con los criterios establecidos, las especies consideradas son: *Grevillea robusta*, *Jacaranda mimosifolia*, *Fraxinus americana*, *Senna spectabilis*, *Ligustrum lucidum*, *Erythrina falcata*, *Ficus elastica*, *Brachychiton populneus*, *Nerium oleander*, *Olea europaea*, *Melia azedarach* e *Inga yngua*.

De igual manera, se detallan las especies liquénicas identificadas y sus biotipos (Figura 2, Tabla 3), de las cuales 8 fueron foliosas y 1 fruticulosa, constatándose a partir de los análisis realizados, que *Teloschistes chrysophthalmus* (L.) Th.Fr. es la más susceptible a los cambios en la calidad del aire.

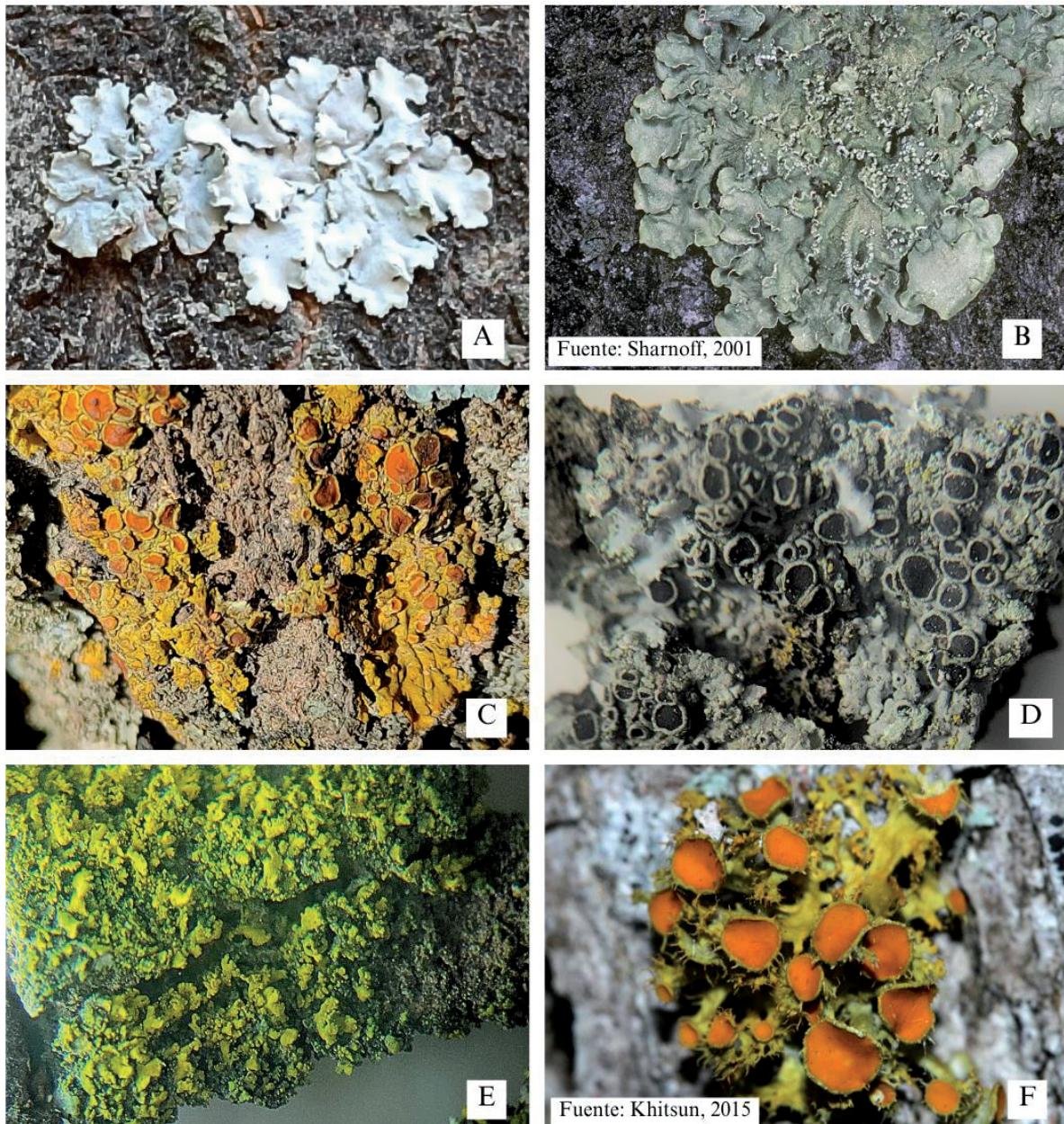
**Tabla 3:** Especies de líquenes utilizadas en el presente estudio y sus biotipos

Especie	Biotipo
<i>Candelaria concolor</i> (Dicks.) Arnold	Foliosa
<i>Flavopunctelia flaventior</i> (Stirt.) Hale	Foliosa
<i>Hyperphyscia syncolla</i> (Tuck. ex Nyl.) Kalb	Foliosa
<i>Physcia undulata</i> Moberg	Foliosa
<i>Physciella</i> sp. Essl.	Foliosa
<i>Punctelia subrudecta</i> (Nyl.) Krog	Foliosa
<i>Pyxine nubila</i> Moberg	Foliosa
<i>Xanthoria parietina</i> (L.) Th.Fr.	Foliosa
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i> (L.) Th.Fr.	Fruticulosa

Por su parte, los datos de frecuencia liquénica fueron sometidos a un análisis de ANOVA indicando diferencias significativas entre las frecuencias de *Candelaria concolor* (Dicks.) Arnold, *Pyxine nubila* Moberg y *Flavopunctelia flaventior* (Stirt.) Hale. Contrariamente, *Teloschistes chrysophthalmus* presentó la menor frecuencia (Figura 3). La especie *Punctelia subrudecta* (Nyl.) Krog fue la que mostró la mayor diferencia de frecuencia entre las dos épocas (lluviosa y seca); opuestamente *Physcia undulata* Moberg es invariable a la época.

El factor de sensibilidad a la contaminación (Qi) fue evaluado para las nueve especies de líquenes, tanto para época lluviosa (h), como para época seca (s), (Figura 4). Este factor corresponde a un valor alto para

especies de menor tolerancia a la contaminación y un valor bajo para aquellas tolerantes a la contaminación. Se determinó a *Teloschistes chrysophthalmus* como la especie de menor tolerancia ( $Qih=8,00$ ;  $Qis=8,00$ ), seguida de *Xanthoria parietina* (L.) Th.Fr. ( $Qih=6,91$ ;  $Qis=7,10$ ) y *Physciella* sp. ( $Qih=7,00$ ;  $Qis=7,00$ ). En general se observa una mayor tolerancia de las especies durante la época húmeda.



**FIGURA 2.** Especies de líquenes estudiados. A. *Pyxine nubila* con coloración de talo blanco distintiva. B. *Flavopunctelia flaventior*, talo con coloración verde clara y rugosidad extrema en los bordes sin apotecios distintivos. C. *Xanthoria parietina*, con talo amarrillo-naranja plano y robusto, con apotecios anaranjados frecuentes. D. *Hyperphyscia syncolla* con talo foliáceo gris y lóbulos pequeños, apotecios lecanorinos. E. *Candelaria concolor*, con talo foliáceo pequeño y amarillo pálido, lóbulos delgados y apotecios diminutos. F. *Teloschistes chrysophthalmus*, presenta una forma fruticulosa con coloración amarillo-grisáceo, apotecios y abundantes y grandes.

Los resultados del Índice de Pureza Atmosférica se presentan en la Tabla 4, tanto para época seca como para época lluviosa (Figura 5). Se determina a la estación 6 ( $IPA_h=11,97$ ), como zona de mayor contaminación, registrado con el valor de IPA más bajo en época lluviosa, que una zona comercial que carece de áreas verdes circundantes, y tráfico permanente (Figura 6A). De igual manera, se registra a la estación 11 ( $IPAs=10,72$ ) con el IPA más bajo y de mayor contaminación en la época lluviosa (Figura 6B). Por otra parte, se registraron a las estaciones 4 y 8 con los valores de IPA más altos ( $IPA_h=22,55$  e  $IPAs=22,69$ ;  $IPA_h=22,81$  e  $IPAs=23,66$ ), correspondientes a zonas sin contaminación, situación que se explica por la presencia de áreas verdes de gran extensión cercanas, como se muestra en las imágenes satelitales (Figura 6C y 6D).

Entre las estaciones que registran cambios de nivel de contaminación entre la época lluviosa y la época seca, están la estación 2 con un cambio de contaminación leve a contaminación media con una diferencia de 3,37 puntos de IPA (Tabla 4), esta estación se caracteriza por ser una zona de alto flujo vehicular y afluencia constante de personas (Figura 6E). El otro cambio se registró en la estación 11, de contaminación leve a media, con una diferencia de 4,84; es una estación caracterizada por ser una zona comercial, rodeada de edificios altos y elevado flujo vehicular, como se muestra en la imagen satelital (Figura 6F). En cambio, la estación nueve registra las diferencias más bajas (0,11) entre ambas épocas, las áreas abiertas circundantes a la estación favorecen a un constante flujo de aire y vientos (Figura 6F).

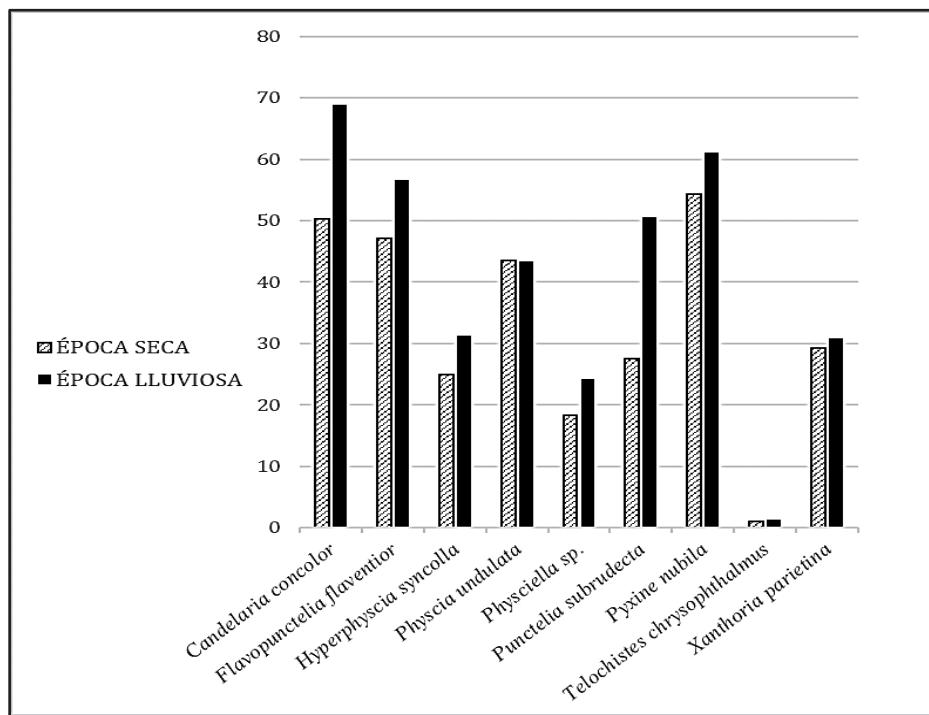


FIGURA 3. Frecuencia liquénica de las especies liquénicas evaluadas.

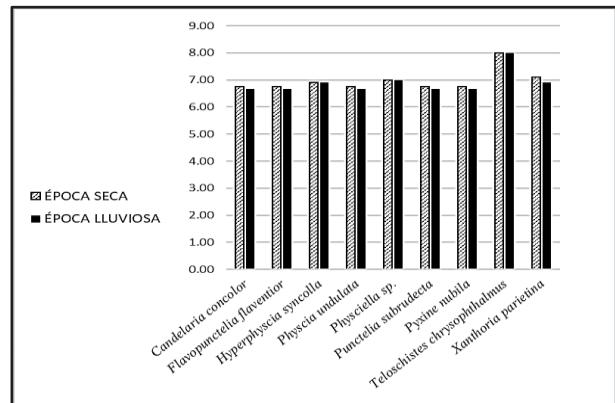


FIGURA 4. Análisis del factor de tolerancia en diferentes épocas.

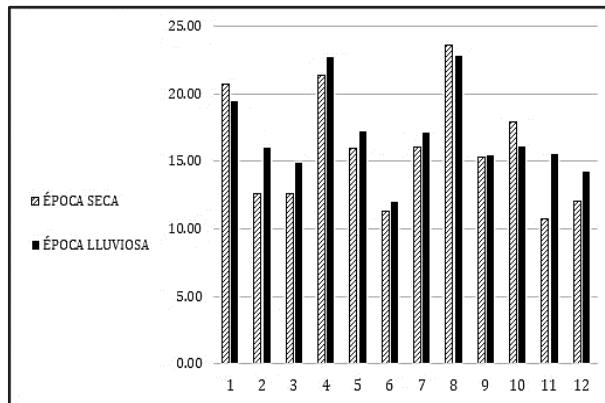
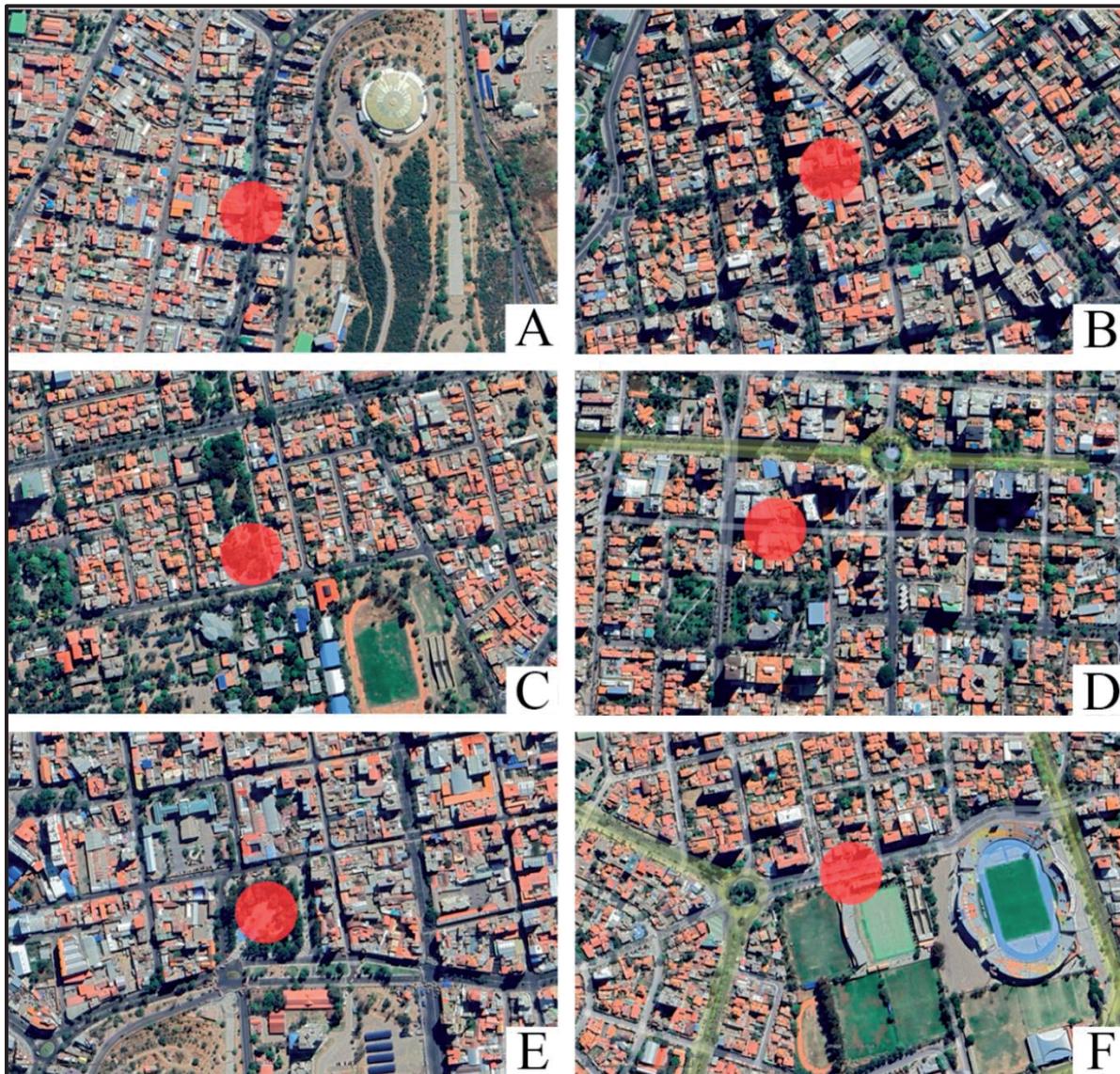


FIGURA 5. Índice de Pureza Atmosférica de la época lluviosa y seca correspondiente a cada estación de muestreo.

## DISCUSIÓN

**Selección y características de los forófitos:** El propósito de este estudio fue evaluar la distribución y composición de comunidades liquénicas en relación con variaciones en la calidad del aire en distintas zonas urbanas. Para lograr esto, se seleccionaron cuidadosamente los forófitos basados principalmente en el pH de la corteza, con el fin de asegurar condiciones homogéneas para la observación de patrones de colonización de líquenes. Para la selección de los forófitos y concorde al criterio de pH similar entre los mismos, se excluyeron las especies *Schinus areira* y *Tecoma stans* Juss. del muestreo debido a un pH significativamente diferente al grupo de especies de forófitos considerados. Se ha evidenciado la preferencia microambiental de algunas especies de líquenes por una especie de forófito en particular (Zárate-Arias *et al.*, 2019), por ello es importante

evaluar este parámetro debido a su influencia en la distribución de las comunidades de líquenes. En cortezas alcalinas, se establecen principalmente especies de líquenes subneutrófilos y neutrófilos. En contraparte, las cortezas ácidas tienden a ser colonizadas por especies acidófilas (Van Herk, 2001). Sin embargo, estudios más recientes determinan la influencia de otros factores distintos al pH sobre el crecimiento de líquenes, como la edad del árbol, las propiedades químicas de la corteza, la rugosidad, y otros (Larsen *et al.*, 2007; Spier *et al.*, 2010). Adicionalmente, para asegurar la validez y precisión en el uso del Índice de Pureza Atmosférica (IPA), este fue adaptado a las características del estudio y se incorporaron ajustes basados en las más de 20 modificaciones de la fórmula original de LeBlanc (1971), las cuales varían de acuerdo a las condiciones de monitoreo y el diseño de la investigación, si los sustratos son o no homogéneos, si existe diferencia de biotipo entre los líquenes y otros factores (Coronado & Castiblanco, 2019; Valdivia & Iannacone, 2020). La fórmula usada en el presente trabajo se adecúa al diseño y las condiciones del área, considerando las características de la comunidad liquénica y el número de forófitos seleccionados en cada estación de muestreo



**FIGURA 6.** Imagen satelital del paisaje urbano y de las estaciones con los menores y mayores valores de IPA, y mayor diferencia entre épocas. A) Estación 6 de contaminación media. B) Estación 11 de contaminación media. C) Estación 4 sin contaminación en los alrededores del parque La Torre. D) Estación 8 sin contaminación. F) Estación 2 con la mayor diferencia entre épocas. F) Estación 9 con la menor diferencia entre épocas. Fuente: Elaborado en base a Google Earth (2024)

**Líquenes como indicadores de contaminación:** Las especies *Teloschistes chrysophthalmus* y *Xanthoria parietina*, se destacan como indicadores claves de la contaminación, mostrando altos valores de sensibilidad ante cambios en la calidad del aire. Estos resultados coinciden con los encontrados por Canseco *et al.* (2006), quien también identificó a *Teloschistes chrysophthalmus* como una especie altamente sensible en ambientes urbanos de La Paz, donde su presencia disminuyó significativamente en áreas con alta contaminación vehicular

y cuya abundancia fue menor, coincidiendo con la baja frecuencia registrada de la especie en el presente trabajo. De manera similar, *Xanthoria parietina* fue documentada por Oller (2017) en Tarija como un indicador importante en zonas con mayores niveles de contaminación atmosférica, reflejando su sensibilidad en ambientes de tráfico elevado. La contaminación vehicular afecta significativamente la cobertura y el crecimiento de líquenes urbanos. La contaminación vehicular, principalmente las emisiones de monóxido de carbono (Abas *et al.*, 2022), óxidos de nitrógeno y metales pesados, dañan las células fúngicas y algales de los líquenes, comprometiendo la fotosíntesis y la absorción de nutrientes (Riddell *et al.*, 2008; Garty *et al.*, 1996). Este patrón se refleja en una reducción de la cobertura liquénica, pues en áreas con intenso tráfico vehicular, se observa una disminución dentro de un radio de 300 metros (Coffey & Fahring, 2012). En los resultados de este estudio también se registraron variaciones significativas entre estaciones con diferentes características urbanas. En particular, las estaciones con mayores valores de IPA coincidieron con aquellas sobre o cercanas a áreas verdes y con menor tráfico vehicular, como lo reportaron Canseco *et al.* (2006), Canaza (2008) y Oller (2017), quienes concluyeron que las áreas con vegetación densa funcionan como zonas de amortiguamiento, disminuyendo la polución atmosférica. Por ejemplo, las estaciones 4 y 8 en el presente estudio, con IPA más altos y sin contaminación, están rodeadas por grandes áreas verdes, lo cual es coherente con los hallazgos en Tarija donde se observó una mejora en la calidad del aire en áreas con mayor cobertura vegetal. Concordantemente, todas las estaciones con IPA's más bajos y de contaminación media son de alto flujo vehicular, como el caso de la estación 6.

**Tabla 4:** Estaciones de muestreo y valores de IPA según la época

NO	Estación de muestreo	Lluviosa		Seca	
		IPA	NIVEL	IPA	NIVEL
1	Av. Belzu/ Av. Heroínas y Sucre	19,48	Leve	20,70	Leve
2	Pz. Esteban Arce	16,0	Leve	12,63	Media
3	Pz. Sucre	14,86	Media	12,59	Media
4	Calle Sucre (Frente al parque La Torre)	22,69	Sin Contaminación	21,36	Leve
5	Av. Aniceto Arce/ Pasteur y Colombia	17,22	Leve	15,99	Leve
6	Av. Aroma (Coronilla)	11,97	Media	11,4	Media
7	Calle Juan Huallparimachi/ Tupac Amaru y Pz. L.F. Guzmán	17,13	Leve	16,05	Leve
8	Calle Buenos Aires/ Av. Gualberto Villarroel y Trinidad	22,81	Sin Contaminación	23,66	Sin Contaminación
9	Av. Juan de La Rosa/ Julio Méndez y Néstor Galindo	15,43	Media	15,46	Media
10	Calle La Paz/ Antezana y Lanza	16,10	Leve	17,89	Leve
11	Calle La Paz/ Av. Ayacucho y Baptista	15,56	Leve	10,72	Media
12	Calle Colombia/ Tumusla y Falsuri	14,24	Media	12,01	Media

*Factores ambientales y microclimáticos en la distribución de líquenes:* En zonas tropicales, donde las precipitaciones son abundantes con condiciones de alta humedad, la diversidad y distribución de líquenes suele ser mayor y está influenciada por factores abióticos específicos que determinan tanto su crecimiento como su abundancia. Algunos estudios como López *et al.*, (2016) y Bates & Farmer (1992), demuestran que factores abióticos como la luz y la temperatura presentan una correlación positiva con la riqueza de especies y cobertura de líquenes fruticosos y foliosos, mientras que la humedad relativa está relacionada negativamente con la riqueza. Entre estos factores, la luz, el viento y la precipitación destacan por su capacidad para modificar el micro hábitat de los líquenes, alterando las condiciones de humedad y disponibilidad de nutrientes (Bhagarathi *et al.*, 2022). En contraste, la riqueza de especies de líquenes urbanos parece estar más influenciada por el microclima y las fuentes de colonización, que por la contaminación vehicular. El microclima, especialmente el nivel de humedad, es crítico para el crecimiento activo de los líquenes ya que, como se mencionó previamente, estos dependen de la hidratación del talo para mantener sus funciones metabólicas (Brodo, 1966; Tretiach *et al.*, 2012). Consecuentemente, los ambientes urbanos con mayor cobertura arbórea, que actúan como fuentes de colonización, favorecen una mayor diversidad de especies, incluso en presencia de niveles moderados de contaminación (Öckinger *et al.*, 2005; Johansson *et al.*, 2012,), debido a la capacidad de las plantas para mitigar la contaminación atmosférica (Forsyth & Musacchio, 2005). Estos ambientes tienden a presentar valores de IPA más elevados (indicando una buena calidad del aire), debido a su gran densidad arbórea.

Estudios adicionales han encontrado que los patrones del IPA están más relacionados con el impacto antrópico que con las principales fuentes de contaminación (Gombert *et al.*, 2004), apoyando la idea de que la distribución de líquenes urbanos responde a diversos factores de las fuentes de contaminación. Incluso, en

áreas forestales con bajas concentraciones de contaminantes, el IPA puede ser empleado para la identificación de parches de bosque con un alto grado de naturalidad y una alta diversidad de líquenes epífitos (Tanona & Czarnota, 2020). Asimismo, se ha demostrado una relación significativa entre la diversidad de líquenes y la calidad del aire (Ramdani *et al.* 2019). Las áreas expuestas a vientos fuertes suelen experimentar una mayor desecación, lo que puede limitar el crecimiento de líquenes (Anstett & Coiner, 2010). Según Jonsson (2009), la etapa de crecimiento activo de los líquenes está restringida a períodos en los que el talo está hidratado por fuentes de agua atmosféricas, como la precipitación, niebla y alta humedad relativa. Este acontecimiento, se ve reflejado en el presente estudio, pues tanto la abundancia, cobertura y frecuencia de *Candelaria concolor*, *Punctelia subrudecta* y *Flavopunctelia flaventior*, fue mayor durante la época lluviosa, un patrón que contrasta con los hábitats templados (Neurohr *et al.*, 2011). Si bien existen estas diferencias en la composición de la comunidad liquénica, al tratarse de un país tropical, la contaminación puede seguir el patrón de la dirección del viento, independientemente de la época del año. En este contexto la distribución y composición de líquenes está condicionada tanto por la calidad del aire como por los factores microambientales y climáticos que garantizan su crecimiento.

*Impacto estacional en la frecuencia y cobertura de líquenes:* Los resultados muestran diferencias significativas en la frecuencia de *Candelaria concolor*, cuyo factor de tolerancia se mantiene constante en época seca y lluviosa, un patrón consistente con el estudio de Gonzales *et al.* (2016). De igual manera, los análisis estacionales revelaron que ciertas especies como *Candelaria concolor* y *Pyxine nubila* son estables en su alta distribución durante todo el año, a diferencia de *Punctelia subrudecta*, con una frecuencia significativamente mayor en la época lluviosa a pesar de mostrar un factor de tolerancia constante a la contaminación en ambas épocas del año.

*Contexto específico de Cochabamba y desafíos en el estudio de líquenes:* A nivel mundial, se estima que la diversidad de líquenes tropicales alcanza aproximadamente 13.000 especies, con alrededor de 7.000 especies presentes en el Neotrópico (Bhagarathi *et al.*, 2022). Si estos estimadores son correctos, se proyecta que la biota de líquenes y hongos liquenícolas en Bolivia podría alcanzar unas 4.000 especies liquenizadas y 800 especies liquenícolas (Rodríguez *et al.*, 2016). Sin embargo, estos datos aún son preliminares y se requiere de más investigación para tener una imagen completa de la riqueza liquénica del país. Aun así, el avance en la flora liquénica de Bolivia ha sido notable en las últimas décadas. Hasta 1998, solo 150 especies de líquenes habían sido registradas en el país (Feuerer *et al.*, 1998). Sin embargo, investigaciones recientes han ampliado considerablemente este número, con cerca de 1400 especies adicionales reportadas y descritas. Según el sitio web “Líquenes y Hongos Liquenícolas de Bolivia”, el catálogo desarrollado por Rodríguez *et al.* (2016) contiene cerca de 1400 especies de líquenes y 81 especies de hongos liquenícolas, y representa aproximadamente el 35% del número esperado de líquenes en Bolivia, dicho catálogo está basado en registros publicados en el país. Con la presencia de tanta diversidad, la ausencia de una guía o catálogo específico de la flora liquénica local, en Cochabamba, Bolivia, presenta un desafío significativo para los estudios de biodiversidad y monitoreo ambiental. A pesar de esta carencia, es crucial trabajar con determinados grupos de líquenes debido a su capacidad para ofrecer respuestas ecológicas importantes y su papel vital como bioindicadores. Los líquenes, por su sensibilidad a cambios en el ambiente y sus bajos costos de monitoreo, se convierten en herramientas esenciales para evaluar la calidad del aire y la salud de los ecosistemas, especialmente en regiones donde los recursos para estudios ambientales son limitados (Morales *et al.*, 2009).

## CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra la utilidad de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire en zonas urbanas, donde el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) permitió evaluar la contaminación atmosférica en distintas estaciones de muestreo de la ciudad de Cochabamba. Las especies *Teloschistes chrysophthalmus* y *Xanthoria parietina* se destacan como indicadores clave a la polución, coincidiendo con estudios previos en Bolivia que evidencian su baja tolerancia en áreas con alta contaminación vehicular. Asimismo, la variación estacional en la frecuencia y cobertura de especies como *Candelaria concolor*, sugiere que la diversidad liquénica se ve más influenciada por las condiciones microambientales que por la contaminación vehicular.

La época lluviosa, caracterizada por condiciones de mayor humedad, favoreció a la abundancia de líquenes. Esto se evidencia por la composición de la comunidad que responde no solo a la calidad del aire, sino también a factores microambientales (especialmente la humedad) y la presencia de vegetación que favorece su colonización. Los resultados confirmaron el rol amortiguador de la vegetación en la mitigación de contaminantes, debido a que las estaciones con mayor cobertura vegetal registraron los valores de IPA más altos, reflejando una calidad óptima del aire. Dado que tanto la contaminación del aire como el cambio climático pueden afectar la sostenibilidad y

biodiversidad a largo plazo, los índices de respuesta de los líquenes ante estos factores pueden ayudar a los investigadores a comprender mejor las causas de los patrones y tendencias de biodiversidad.

La ausencia de una guía específica de identificación de líquenes para Cochabamba, limita nuestro entendimiento sobre la diversidad y distribución de los líquenes en esta región. Un catálogo detallado permitiría no solo identificar las especies presentes, sino también evaluar su estado de conservación y su rol en los ecosistemas locales.

## AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento al Departamento y la Carrera de Biología por el valioso apoyo brindado durante el procesamiento de algunas de las muestras, sin el cual este trabajo no hubiera sido posible. En particular, extendemos nuestro agradecimiento a Silvia Castellón, responsable de los laboratorios del Departamento de Biología, por su constante disponibilidad y guía. A Jhovanka Torrico, encargada del Laboratorio de Servicios Académicos, Microbiología e Investigación (LSAMI), por su enorme colaboración, confianza y disposición para facilitar todos los recursos necesarios. Y a Jennifer Cahill por su orientación y apoyo en el desarrollo del estudio. De igual manera, queremos agradecer sinceramente a nuestros compañeros y amigos que nos acompañaron en este camino: Mauricio Caballero, cuya colaboración fue esencial en la identificación de forófitos y a Rut Tito Siles y Marcelo Quevedo, por su enorme apoyo durante la extenuante fase de campo. A todos quienes contribuyeron de diferentes maneras para que este proyecto se convierta en un resultado gratificante, extendemos nuestro más sincero y profundo agradecimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abas, A. 2021. A systematic review on biomonitoring using lichen as the biological indicator: A decade of practices, progress and challenges. *Ecological Indicators* 121: 1–11.
- Abas, A., N.H. Asnawi, K. Aiyub, A. Awang & S.R. Abdullah. 2022. Lichen biodiversity index (LBI) for the assessment of air quality in an industrial city in Pahang, Malaysia. *Atmosphere* 13(11): 1-15.
- Anstett, D. & H. Coiner. 2010. The influence of wind and light exposure on the extent of lichen coverage in an alpine environment. *University of Toronto Journal of Undergraduate Life Sciences* 4(1): 38-41.
- Anze, R. 1993. Ensayos para la utilización de líquenes del Valle de La Paz como indicadores de contaminación atmosférica por dióxido de azufre. Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- Anze, R. 1996. Líquenes del Valle de La Paz como bioindicadores de contaminación atmosférica. *Ecología en Bolivia* 28: 65–80.
- Anze, R., M. Franken, M. Zaballa, M.R. Pinto, G. Zeballos, M.D.L.A. Cuadros, A. Canseco, A. De la Rocha, V.H. Estellano & S. Del Granado. 2007. Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista virtual REDESMA* 1: 53–74.
- Barreno, E. & S. Pérez-Ortega. 2003. Líquenes de la Reserva Natural Integral de Muniellos, Asturias. Editorial KRK. Asturias, España, 133–429.
- Bates, J.W. & A.M. Farmer (eds.). 1992. Bryophytes and lichens in a changing environment. Clarendon Press. Oxford, United Kingdom, 404 p.
- Bhagarathi, L.K., G. Maharaj, P.N. DaSilva & G. Subramanian. 2022. A review of the diversity of lichens and what factors affect their distribution in the neotropics. *GSC Biological & Pharmaceutical Sciences* 20(3): 027–063.
- Brodo, I.M. 1966. Lichen growth and cities: a study on Long Island, New York. *Bryologist* 69: 427–449.
- Brodo, I.M., S.D. Sharnoff & S. Sharnoff. 2001. Lichens of North America. Editorial Yale University Press. Connecticut, United States of America, 828 p.
- Canaza, M. 2008. Líquenes epífitos como bioindicadores de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba-Bolivia. Tesis de Grado. Departamento de Biología, Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia.
- Canseco, A. 2004. Comunidades de líquenes: Indicadoras del nivel de calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia.
- Canseco, A., R. Anze & M. Franken. 2006. Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Acta Nova* 3(2): 286–307.
- Coffey, H.M. & L. Fahrig. 2012. Relative effects of vehicle pollution, moisture and colonization sources on urban lichens. *J. App. Ecol.* 49(6): 1467–1474.
- Coronado, K. & D. Castiblanco. 2019. Líquenes como bioindicadores en la evaluación de la calidad del aire en cinco colegios públicos ubicados en las principales vías de la Ciudad de Bogotá DC. Tesis de Grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.
- Devkota, S., R.P. Chaudhary, S. Werth & C. Scheidegger. 2017. Indigenous knowledge and use of lichens by the lichenophilic communities of the Nepal Himalaya. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine* 13: 1–10.
- Estrada, V.H.M. & J.M. Nájera. 2011. El uso de líquenes como biomonitor para evaluar el estado de la contaminación atmosférica a nivel mundial. *Biocenosis* 25(1-2): 51–67.

- Fernández E., F.J. Baya., C.A. Cruz., C.A. Soliz., A.F. Baya & G.G. Torrico. 2016. Guía de Árboles y Arbustos del Campus “Las Cuadras”, Valorando la Universidad Mayor de San Simón. Dirección de Investigación Científica y Tecnológica. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia, 150 p.
- Feuerer, T., T. Ahti & O. Vitikainen. 1998. Lichenological investigations in Bolivia. pp. 71–86. En: Marcelli, M.P. & M.R.D. Seaward (eds.), *Lichenology in Latin America: History, current knowledge and applications*. Editorial CETESB. São Paulo, Brasil, 179 p.
- Forsyth, A. & L. Musacchio. 2005. Designing small parks: a manual for addressing social and ecological concerns. Editorial John Wiley & Sons. New Jersey, United States of America, 224 p.
- García, L. & L. Rubiano. 1984. Comunidades de líquenes como indicadores de niveles de calidad del aire en Colombia. *Contaminación ambiental* 8: 73–90.
- Garty, J., M. Kauppi & A. Kauppi. 1996. Accumulation of airborne elements from vehicles in transplanted lichens in urban sites. *J. Environm. Qual.* 25(2): 265–272.
- GBIF. 2024. Global Biodiversity Information Facility: Free and open access to biodiversity data. Disponible en <https://www.gbif.org/> (acceso en: 13/01/2025).
- Gonzales, N., M. Luján, G. Navarro & R. Flores. 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.
- Gombert, S., J. Asta & M.R.D. Seaward. 2004. Assessment of lichen diversity by index of atmospheric purity (IAP), index of human impact (IHI) and other environmental factors in an urban area (Grenoble, southeast France). *Science of the total environment* 324(1-3): 183-199.
- Google Earth 7.3.6.10201. 2024. Disponible en <https://earth.google.com/web/> (acceso en: 06/11/2024).
- Hawksworth, D.L., T. Iturriaga & A. Crespo. 2005. Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medioambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de micología* 22(2): 71–82.
- Heredia-Abarca, G.P. 2020. La importancia de los hongos (Fungi) en los servicios ecosistémicos. *Bioagrociencias* 13(2): 98–108.
- Huereca-Delgado, A., S.M. Salcedo-Martínez, M. Alvarado-Vázquez & S.M. Limón. 2018. Los líquenes: definición, características, importancia y usos potenciales. *Biología y Sociedad* 1(1):17-27.
- Illana-Esteban, C. 2009 Líquenes comestibles. *Boletín de la Sociedad Micológica de Madrid*. 33: 273–282.
- Johansson, V., T. Ranius & T. Snäll. 2012. Epiphyte metapopulation dynamics are explained by species traits, connectivity, and patch dynamics. *Ecology* 93(2): 235–241.
- Jonsson, A.V. 2009. Modeling lichen performance in relation to climate: scaling from thalli to landscapes. Tesis de Doctorado. Department of Ecology and Environmental Sciences, Faculty of Science and Technology, Universitet Umeå. Umeå, Sweden.
- Jørgensen, P. M., M. H. Nee & S. G. Beck. (eds.) 2014. Catálogo de Plantas Vasculares de Bolivia. Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard. 127: i-viii, 1–1744.
- Khitsun, A. 2015. Consortium of Lichen Herbaria: *Teloschistes chrysophthalmus* (L.) Th.Fr. University of Central Oklahoma Lichen Herbarium. Disponible en <https://lichenportal.org/portal/collections/individual/index.php?occid=2699662> (acceso en: 13/01/2025).
- Larsen, R.S., J.N.B. Bell, P.W. James, P.J. Chimonides, F.J. Rumsey, A. Tremper & O.W. Purvis. 2007. Lichen and bryophyte distribution on oak in London in relation to air pollution and bark acidity. *Environmental pollution* 146(2): 332–340.
- LeBlanc, F. & J. De Sloover. 1970. Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canad. J. Bot.* 48(8): 1485–1496.
- LeBlanc, F. 1971. Possibilities and methods for mapping air pollution on the basis of lichen sensitivity. *Boletín Mitteilungen der forstlichen Bundes-Versuchsanstalt Wien* 92: 103–126.
- Lijteroff, R., L. Lima & B. Prieri. 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.
- López, L.G.C., E.A. Medina & A.M. Peña. 2016. Effects of microclimate on species diversity and functional traits of corticolous lichens in the Popayan Botanical Garden (Cauca, Colombia). *Cryptog. Myco.* 37(2): 205–215.
- MMAyA. 2021. Ministerio de Medio Ambiente y Agua: Informe nacional de calidad del aire de Bolivia gestiones 2019, 2020 y 2021, 206 p. Disponible en: <http://snia.mmaya.gob.bo/web/modulos/PNGCA/publicaciones/items/15052023/CALIDAD%20DEL%20AIRE%20final%20impreso.pdf> (acceso en: 13/01/2025).
- Mercado, M., S. Arrázola & M. Atahuachi. 2019. Flora ornamental urbana de Cochabamba. Centro de Biodiversidad y Genética. Dirección de Investigación de Ciencia y Tecnología. Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia, 275 p.
- Morales, E.A., R. Lücking & R. Anze. 2009. Una introducción al estudio de los líquenes de Bolivia. *Universidad Católica Boliviana “San Pablo” Serie Ecología* (1): 1–58.
- Nash, T.H. (ed.). 1996. Lichen biology. 1ra ed. Editorial Cambridge University Press. New York, USA, 315 p.

- Navarro, G., L. Aguirre & M. Maldonado (eds.). 2015. Biodiversidad, ecología y conservación del Valle Central de Cochabamba. Centro de Biodiversidad y Genética (CBG). Universidad Mayor de San Simón. Cochabamba, Bolivia, 300 p.
- Neurohr, E., J. Monge-Nájera & M.I. González. 2011. Air pollution in a tropical city: the relationship between wind direction and lichen bio-indicators in San José, Costa Rica. *Revista Biol. Trop.* 59(2): 899–905.
- Nylander, M.W. 1866. Les Lichens Du Jardin Du Luxembourg. *Bull. Soc. Bot. France* 13(7): 364–371.
- Öckinger, E., M. Niklasson & S.G. Nilsson. 2005. Is local distribution of the epiphytic lichen *Lobaria pulmonaria* limited by dispersal capacity or habitat quality?. *Biodivers & Conservation* 14: 759–773.
- Oller, O. J. 2017. Empleo de bioindicadores para determinar la calidad del aire en la ciudad de Tarija en puntos de muestreo de red MoniCA. *Acta Nova* 8(3): 307–321.
- Pescott, O.L., J.M. Simkin, T.A. August, Z. Randle, A.J. Dore & M.S. Botham. 2015. Air pollution and its effects on lichens, bryophytes, and lichen-feeding Lepidoptera: review and evidence from biological records. *Biol. J. Linn. Soc.* 115(3): 611–635.
- Ramdani, M., F. Adjiri & T. Lograda. 2019. Relationship between lichen diversity and air quality in urban region in Bourdj Bou Arriridj, Algeria. *Biodiversitas* 20(8): 2329–2339.
- Riddell, J., T.H. Nash & P. Padgett. 2008. The effect of HNO<sub>3</sub> gas on the lichen *Ramalina menziesii*. *Flora-Morphol. Distrib. Funct. Ecol. Pl.* 203(1): 47–54.
- Rodríguez, P., A. Flakus, M. Kukwa, R. Lücking, R. Meneses, E. Rivas, D. Stanton, C. Truong & R. Vargas. 2016. Líquenes y hongos liquenócolas de Bolivia: Catálogo preliminar de líquenes y hongos liquenócolas de Bolivia. Instituto de Botánica W. Szafer, Academia Polaca de Ciencias. Disponible en <http://bio.botany.pl/lichens-bolivia/es.strona.catlogo-.5.html> (acceso en: 13/01/2025).
- Seaward, M.R. 2008. Environmental role of lichens. *Lichen biology*. pp 274–298. En: T.H. Nash III (ed.). *Lichen Biology*. 2da ed. Editorial Cambridge University Press. New York, United States of America, 477 p.
- Sharnoff, S. 2001. Consortium of Lichen Herbaria: *Flavopunctelia flaventior* (Stirt.) Hale. Sharnoff Image Collection. Disponible en <https://lichenportal.org/portal/collections/individual/index.php?occid=4931142> (acceso en: 13/01/2025).
- Spier, L., H. Van Dobben & K. Van Dort. 2010. Is bark pH more important than tree species in determining the composition of nitrophytic or acidophytic lichen floras?. *Environmental pollution* 158(12): 3607–3611.
- Steubing L. & A. Fangmeier. 1992. Plant ecological training course: field and laboratory practicals in terrestrial plant ecology. Editorial Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co. Stuttgart, Germany, 205 p.
- Tanona, M. & P. Czarnota. 2020. Index of Atmospheric Purity reflects the ecological conditions better than the environmental pollution in the Carpathian forests. *Journal of Mountain Science* 17(11): 2691–2706.
- Thakur, M., S. Bhardwaj, V. Kumar & J. Rodrigo-Comino. 2023. Lichens as effective bioindicators for monitoring environmental changes: a comprehensive review. *Total Environment Advances* 9: 1–9.
- Tretiach, M., S. Pavanetto, E. Pittao, L. Sanità di Toppi & M. Piccotto. 2012. Water availability modifies tolerance to photo-oxidative pollutants in transplants of the lichen *Flavoparmelia caperata*. *Oecologia* 168: 589–599.
- Tropicos.org. 2024. Missouri Botanical Garden. Disponible en <https://tropicos.org/home> (acceso en: 13/08/25).
- Valdivia, D. & J. Iannaccone. 2020. Líquenes como medio de evaluación ambiental—aplicaciones del índice de pureza atmosférica (IPA). *Biotempo* 19 (1): 101–108.
- Van Herk, C.M. 2001. Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time. *The lichenologist* 33(5): 419–441.
- Verein Deutscher Ingenieure. 2003. VDI 3957: Biological measurement procedures for determining and evaluating the effects of ambient air pollutants by means of lichens (bioindication) - Mapping the diversity of epiphytic lichens as an indicator of air quality. Method of standardized grass exposure. Documento técnico 13. Beuth Verlag GmbH, Alemania.
- Wirth, V., R. Düll, X. Llimona, R.M. Ros & O. Werner. 2004. Guía de campo de los líquenes, musgos y hepáticas: con 288 especies de líquenes y 226 de briófitos (musgos y hepáticas). Editorial Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España, 590 p.
- Zárate-Arias, N., M. Moreno-Palacios & A. Torres-Benítez. 2019. Diversidad, especificidad de forófito y preferencias microambientales de líquenes corticolas de un bosque subandino en la región Centro de Colombia. *Revista Acad. Colomb. Ci. Exact.* 43(169): 737–745.
- Zedda, L. & G. Rambold. 2015. The diversity of lichenised fungi: ecosystem functions and ecosystem services. pp 121–145. En: Upreti, D., P. Divakar, V. Shukla, R. Bajpai (eds.), *Recent Advances in Lichenology: Modern methods and approaches in lichen systematics and culture techniques*. 2do volumen. Editorial Springer. New Delhi, India, 232 p.
- Zuñiga-González, R.A., I.L. Álvarez-Barajas, A.Y. Corral-Avitia, J.P. Flores-Margez, I.D. Enríquez-Anchondo & M. Quiñónez-Martínez. 2021. Diversidad, ecología y uso potencial de líquenes epífitos de Chihuahua. *Ciencia en la frontera* 16(2): 19–32.