

Aplicabilidad de líquenes bioindicadores como herramienta de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba

Applicability of bioindicators lichens as monitoring tool for air quality in Cochabamba

Nathalie Gonzales Vargas, Marcos Luján Pérez, Gonzalo Navarro Sánchez & Rodrigo Flores Mercado

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana San Pablo, Unidad Académica de Cochabamba, c. Márquez s/n, Zona Tupuraya, Cochabamba Bolivia

nathygonzalesv@gmail.com

Resumen: El presente estudio se llevó a cabo en el eje metropolitano del municipio de Cercado de la ciudad de Cochabamba-Bolivia, utilizando líquenes epífitos como bioindicadores de la contaminación atmosférica, a través del método del Índice de Pureza Atmosférica (IPA). La investigación se realizó en 9 puntos de monitoreo, tomando como único forófito la especie *Fraxinus americana*, encontrándose 12 especies de líquenes en total. Se obtuvieron datos de parámetros climáticos, contaminantes atmosféricos, cobertura y frecuencia de las comunidades líquénicas para cada punto de monitoreo, los cuales fueron sometidos a análisis estadísticos de correlaciones de Spearman, clasificación o Cluster y análisis de Senderos. Se comprobó que los líquenes epífitos se ven afectados directamente por la contaminación atmosférica (principalmente por NO₂ y PM₁₀) e indirectamente por parámetros climáticos y/o geomorfológicos. En el caso del Valle de Cochabamba, la inversión térmica se ve influenciada directamente por la temperatura mínima del mes más frío y la altura, aumentando la contaminación en zonas más bajas y por ende la disminución de comunidades líquénicas. A través de IPA se lograron identificar zonas de isocontaminación, utilizando el programa ArcGis, donde áreas con mala calidad del aire fueron identificadas en la zona sur, mientras que áreas con mejor calidad del aire en la zona norte. Se identificaron como especies más tolerantes a la contaminación global a *C. concolor*, *P. pachyphylla*, *P. nubila*, mientras las más sensibles fueron *H. syncolla* y *T. chrysophthalmus*.

Palabras clave: Bioindicadores, contaminación atmosférica, líquenes, parámetros climáticos, análisis estadísticos.

Abstract: This study was performed in the metropolitan area of Cercado in Cochabamba - Bolivia, using epiphytic lichens as bioindicators of air pollution, through the Index of Atmospheric Purity (IAP) method. The research was carried

out in 9 monitoring points, taking *Fraxinus americana* as the only phorophyte, where 12 species of lichens were found in total. Data of climate parameters, pollutants, coverage and frequency of lichen communities were obtained in each monitoring point, in order to establish a statistical analysis using Spearman correlations, cluster and path analysis. It was found that the epiphytic lichens are affected directly by atmospheric pollution (mainly NO₂ and PM₁₀) and indirectly by climate parameters and/or geomorphological data. In the case of Cochabamba's Valley, the temperature inversion is influenced directly by the minimum temperature of the coldest month and height, increasing pollution in lower areas and thus decreasing lichen communities. The development of IAP was able to identify isocontamination zones by the ArcGis program, where areas with poor air quality were identified in the south and areas with better quality in the north. We identified as more tolerant species to global pollution, *C. concolor*, *P. pachyphylla* and *P. nubila*, while the most sensitive were *H. syncolla* and *T. chrysophthalmus*.

Key words: Bioindicadores, air pollution, lichens, climatic parameters, statistical analysis.

1 Introducción

Las ciudades son por naturaleza concentraciones de humanos, materiales y actividades, exhibiendo tanto los niveles más altos de contaminación como los niveles más grandes de impacto ambiental (Castell, 2011). La quema de combustibles fósiles resulta ser la actividad que genera la mayor cantidad de gases contaminantes. Estas fuentes emiten diferentes gases a la atmósfera, donde los más comunes llegan a ser: óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), partículas en suspensión, metales pesados y compuestos orgánicos, como el benceno y los hidrocarburos aromáticos policíclicos (Anze, 2007). La diversidad y toxicidad de estos gases atmosféricos provocan efectos adversos en el clima (cambio climático) y efectos nocivos en la salud, sobre todo enfermedades respiratorias (Echague, 2001).

Para la medición de la calidad del aire, existen métodos fisicoquímicos bien establecidos que permiten establecer el nivel de la contaminación atmosférica, a través de las concentraciones de contaminantes criterio. Por otra parte, también existen bioindicadores, que caracterizan de una manera rápida, económica y eficiente la calidad del aire; entre estos se encuentran los líquenes (Estrada & Monje, 2011). Por lo tanto, los bioindicadores pueden ser útiles, de modo complementario o alternativo a los métodos fisicoquímicos, para establecer los riesgos de la contaminación atmosférica sobre organismos vivos y el ecosistema en general (Castell, 2011).

El uso de bioindicadores se ha ido desarrollando en varios países del mundo y con el propósito de utilizarlos como una herramienta rutinaria de diagnóstico, monitoreo y gestión de la calidad del aire en entidades ambientales (Giordani,

2007). Los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire, están siendo objeto de estudio a nivel mundial, causando un gran impacto en la investigación moderna (Osuna & Martínez, 2011).

Actualmente la evaluación de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba es monitoreada a través de equipos automáticos y medidores pasivos (GAM, Cochabamba, 2011). Si bien estos métodos determinan eficientemente la concentración de algunos contaminantes criterio, no denotan el efecto integrado de los contaminantes sobre los organismos vivos, lo cual puede ocasionar una mala interpretación de la calidad del aire y problemas en la toma de decisiones por parte de las autoridades para prevenir y mitigar los riesgos reales en la salud pública.

Por consiguiente, la presente investigación tiene como propósito determinar la aplicabilidad de líquenes como bioindicadores de la calidad integral del aire, a través de una comparación con los métodos de monitoreo convencionales y su variabilidad respecto a factores climáticos y geomorfológicos que alteren su distribución, a lo largo de un transecto en el Valle Central de Cochabamba.

1.1 Bioindicadores de la calidad ambiental

El concepto de organismos indicadores se refiere a especies seleccionadas por su sensibilidad o tolerancia a varios parámetros, ya sean ambientales o de contaminación (Silva *et al.*, 2006). Según Anze (2007), los bioindicadores son organismos o comunidades de organismos que pueden responder a la contaminación ambiental mediante alteraciones en su fisiología o a través de su capacidad para acumular contaminantes. Estos miden los efectos de la contaminación en seres vivos, por lo tanto ofrecen información sobre los riesgos para otros organismos y ecosistemas. Por lo tanto los bioindicadores son organismos que pueden ser usados para la identificación y determinación cualitativa de los contaminantes ambientales generados por los humanos (Gómez, Fernández, & Galarraga, 2013).

El uso de bioindicadores debe contemplar todas las fuentes de variabilidad que pueden afectar su respuesta ante las condiciones ambientales o de contaminación. Por lo tanto se deben controlar o eliminar a las denominadas variables de confusión, que resultan ser variables externas a la relación que se evalúa y relacionadas tanto con la exposición como con la respuesta (en este caso de los líquenes). Su presencia por lo tanto puede producir sesgos en la relación de la variable dependiente e independiente, además de una interpretación errónea de resultados.

1.2 Índice de Pureza Atmosférica (IPA)

El Índice de Pureza Atmosférica es un índice biológico que considera la presencia, cobertura, abundancia y distribución de las especies de líquenes en una misma área, donde la contaminación existente puede producir alteraciones en la estructura de las poblaciones líquénicas. La pérdida selectiva de individuos sensibles, se traduce en la alteración de la estructura de la comunidad de líquenes epífitos (Anze, 2007).

Dicho índice fue formulado por primera vez por Le Blanc y De Sloover (1970) para medir la calidad de aire alterada por una fuente industrial. Este índice ha ido experimentando varias modificaciones por varios autores a través del tiempo (Nimis, 2002).

De esta forma en una zona con altos niveles de contaminación atmosférica se puede esperar encontrar muy pocas especies de líquenes, pero representadas por individuos tóxicotolerantes. En cambio en una zona con bajos índices de contaminación, existe una gran diversidad de comunidades líquénicas y así un mayor equilibrio en el número de individuos presentes. Este índice refleja la riqueza o escasez de la biodiversidad líquénica epífita de una determinada zona y es válido únicamente a nivel comparativo entre territorios o regiones que presenten aproximadamente la misma climatología y ecología (Canseco, 2004).

1.3 Índice de diversidad de Shannon y Wiener

La biodiversidad es uno de los principales intereses para los estudios ecológicos, pero la cuantificación de la diversidad de las especies de las comunidades ecológicas resulta ser más complicada y necesita un mejor desarrollo (Kerkhoff, 2010).

Uno de los índices más utilizados para cuantificar la biodiversidad específica es el de Shannon y Wiener, derivado de la teoría de información como una medida de la entropía. Este índice refleja la heterogeneidad de una comunidad sobre la base de dos factores importantes: el número de especies presentes y su abundancia relativa. Conceptualmente es una medida del grado de incertidumbre asociada a la selección aleatoria de un individuo en la comunidad (Pla, 2006).

Por lo tanto el índice de Shannon y Wiener es un índice que mide la equitatividad de una comunidad para ver si es similar a la cantidad de información en un código o mensaje. Según (Kerkhoff, 2010) los valores típicos son generalmente entre 1,5 y 3,5 en la mayoría de los estudios ecológicos, y el índice es rara vez superior a 4. Este índice aumenta a medida que la riqueza y la uniformidad u homogeneidad de la comunidad es mayor.

2 Metodología

2.1 Zona de estudio

El área de estudio se ubica en la cuenca central del Valle de Cochabamba, Provincia Cercado, específicamente en el sector Sur-Oeste del departamento de Cochabamba (Gobierno Municipal de Cochabamba, 2014). El valle central de Cochabamba se encuentra dentro de la Región Andina Tropical en la Provincia Biogeográfica Boliviano-Tucumano, ocupando el sector del Piray-Río Grande (Navarro & Ferreira, 2009). Con base a datos meteorológicos del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, SENAMHI, y el modelo bioclimático de Rivas-Martínez, el macrobioclima del valle de Cochabamba es tropical, con un bioclima xérico y un ombrotipo semiárido superior (Córdova, 2013).

Los cambios en las fuentes de emisión, fundamentalmente hacia el tráfico vehicular, han ido modificando la contaminación atmosférica en el Municipio de Cercado, haciendo más importante los componentes foto-químicos, como el ozono (O_3) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), por lo tanto su contaminación atmosférica proviene principalmente de las emisiones vehiculares. (Saurina, Barceló, & Sáez, 1999).

2.2 Zonificación del Valle Central de Cochabamba

Para la zonificación del Valle Central de Cochabamba (Cercado), primeramente se obtuvieron mapas de isotermas, isoyetas y geomorfología de la cuenca de Cochabamba, pertenecientes al PROMIC (2011); los cuales fueron adaptados y modificados con datos de los últimos 10 años (2006 al 2015).

Se utilizó la zonificación geodáfica de Córdova (2013) como mapa base, la cual se adaptó únicamente al eje metropolitano del valle. Se tomó como isoterma la temperatura mínima del mes más frío de los últimos 10 años "m", ya que este parámetro denota el fenómeno de la inversión térmica en el valle. Por otra parte en los mapas de isotermas e isoyetas, se interpolaron los datos de cada línea de temperatura y precipitación, utilizando el programa de Sistemas de Información Geográfica ArcGis 10.1.

2.3 Selección de puntos de muestreo y toma de datos de las comunidades líquénicas

Se realizó un recorrido y observación a varios parques en el Municipio de Cercado Cochabamba, a manera de identificar la especie de un forófito que se encuentre distribuido en todo el Valle central y sea apto para el desarrollo del IPA. Por otra parte se buscó un lugar que no presente indicios de contaminación (zona testigo), el cual sirvió para el cálculo de los rangos en etapas posteriores.

Para la selección del forófito en los parques, se tomaron en cuenta los siguientes criterios, según Asta (2002): a) adultos sanos, con un mínimo de 70 cm de perímetro del tronco a la altura del pecho (DAP) y con una inclinación menor a 10°; b) individuos de corteza rugosa; c) exclusión de árboles dañados, pintados o de corteza lisa, árboles que se encuentren cerca de vías de transporte (Avenidas-calles).

Se obtuvieron puntos de monitoreo a través de un recorrido y observación de varios parques en el eje metropolitano, los cuales cumplían con el número mínimo de árboles (10). Para finalizar esta etapa se realizaron colectas de líquenes para su posterior identificación en la Universidad Mayor de San Andrés, en la ciudad de La Paz.

Cabe mencionar que el muestreo de líquenes se realizó en la época seca del año 2015, durante la primera semana del mes de agosto y en la época húmeda del año 2016, en las primeras semanas de los meses febrero, marzo y abril.

2.4 Determinación de índices biológicos

En cada zona de monitoreo se aplicó la metodología para el análisis de datos cuantitativo conocido como cartografía de líquenes a cada forófito seleccionado, siguiendo la Norma VDI-3799 (1991), y adaptada por Nimis (1999). Se utilizó una rejilla de relevamiento de líquenes, en donde la altura de muestreo fue entre 1,50 hasta 2 m (DAP), que es la altura donde las personas se ven afectadas por la contaminación atmosférica (inmisión). La rejilla contó con una superficie de 1 m² para cada lugar de muestreo, conformada por 10 cuadrados (2x5 cuadrados), donde cada cuadrado de la rejilla tuvo un área de 10x10 cm².

Los parámetros medidos en cada forófito fueron: frecuencia (número de cuadrados en los que se encuentra una especie de estudio) y cobertura/abundancia (porcentaje de dicha especie en la superficie cubierta). La riqueza de especies de líquenes y su abundancia se determinó por árbol y por cada parque, donde la Riqueza (S) resulta ser el número de especies presentes

Las mediciones de diversidad líquénica, que implican la combinación de la riqueza de especies con su abundancia, se calcularon también por árbol y por parque por medio del Índice de Shannon y Wiener (H), a través de la siguiente fórmula (Moreno, 2001):

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i \quad (\text{ec. 1})$$

Dónde:

H' = índice de Shannon y Wiener

p_i = abundancia relativa o cobertura de la especie i . En este caso p_i es igual al área que ocupó cada especie en la gradilla de muestreo

n = número total de especies o riqueza por parque

Se calculó también el Valor de Importancia (VI) para cada especie tanto en la época seca como en la época húmeda, siguiendo la siguiente fórmula (Castell, 2011):

$$VI = \sqrt{P^2 + A^2} \quad (\text{ec. 2})$$

Dónde:

P = frecuencia de aparición de la especie i por parque, respecto a los nueve parques estudiados

A = frecuencia de aparición respecto al total de árboles muestreados, que para este estudio fueron 90

Para el cálculo del Índice de Pureza Atmosférica se utilizó la fórmula establecida por Le Blanc & De Sloover (1970) y modificada por Steubing & Fangmeier (1992), la cual se basa en un estudio fitosociológico y de tolerancia/sensibilidad a los contaminantes, calculándose de la siguiente manera:

$$IPA_j = \frac{1}{n} \sum (f_i * Q_i) \quad (\text{ec. 3})$$

Dónde:

IPA_j = Índice de Pureza Atmosférica de la estación j

n = número total de forófitos censados o muestreados en cada estación j

f_i = grado de frecuencia, más grado de cobertura, más el número de los árboles examinados cubiertos por la especie en cuestión, en una escala del 1 al 5, elaborada por Braun Blanquet, utilizando el método fitosociológico (Alcazar, 2013)

Q_i = factor de tolerancia/sensibilidad de la especie i

Q_i se encuentra definida como el número promedio de especies acompañantes de la especie i en todas las estaciones. Y se lo determina con la siguiente ecuación (Rubiano, 2006):

$$Q_i = \sum_j \frac{(A_j - 1)}{N_j} \quad (\text{ec. 4})$$

Dónde:

Q_j = factor de resistencia de la especie i

A_j = número de especies presentes en cada estación (j) donde se encuentra la especie i

N_j = número de estaciones (j) donde se encuentra la especie i

2.5 Determinación de concentraciones de contaminantes atmosféricos y parámetros climáticos

La medición de las concentraciones de O_3 y NO_2 se realizó cada semana durante los meses de febrero, marzo y abril (época húmeda), para la determinación de la media mensual de dichos contaminantes. Para la determinación de ambas concentraciones, se utilizaron protocolos de tubos pasivos de la Red Mónica.

Posteriormente se realizó una interpolación lineal “Moving Average”, utilizando el programa de Sistema de Información Geográfica “ILWIS 3.2”, para la obtención de datos meteorológicos de la temperatura media, precipitación anual, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, temperatura mínima del mes más frío, amplitud térmica y datos de PM_{10} en los puntos de muestreo.

Para la interpolación, se tomaron las estaciones meteorológicas del SENAMHI y estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos de la Red Mónica, ubicadas dentro y cerca del municipio de Cercado.

Para finalizar esta etapa, se realizó la determinación de tres Índices de Calidad del Aire (ICA's) diferentes, con el objetivo de saber cuál de ellos presenta una mejor correlación con los IPA's obtenidos en la etapa anterior.

Los Índices de Calidad del Aire se obtuvieron siguiendo las siguientes ecuaciones, donde la primera fórmula actualmente es utilizada en la Normativa Boliviana.

$$IQ_1 = \text{Max} \left(\frac{C_i}{C_{\text{límite}}} * 100 \right) \quad (\text{ec. 5})$$

$$IQ_2 = \text{Media} \left(\frac{C_i}{C_{\text{límite}}} * 100 \right) \quad (\text{ec. 6})$$

$$IQ_3 = \left(\prod_{i=1}^n \left(\frac{C_i}{C_{\text{límite}}} * 100 \right) \right)^{1/n} \quad (\text{ec. 7})$$

Dónde:

C_i =concentración del o los contaminantes obtenidos

$C_{\text{límite}}$ =Concentración límite de dichos contaminantes según la normativa boliviana

Cabe mencionar que estos índices se obtuvieron a partir de las concentraciones de NO_2 , O_3 y PM_{10} .

2.6 Análisis de datos e interpretación

Para la correlación estadística se utilizó el método de Spearman, utilizando el programa estadístico 'Minitab', donde se correlacionaron las variables de contaminantes atmosféricos (promedios mensuales de NO₂, O₃ y PM₁₀), parámetros climáticos e Índices de Calidad del Aire con el Índice de Pureza Atmosférica, para posteriormente realizar una prueba de hipótesis P-Value, con un nivel de confianza del 95%.

Posteriormente se realizó un "Path Analysis" o también conocido como "Análisis de Senderos" para determinar la causalidad multivariada del IPA frente al conjunto de variables de contaminación y datos climáticos en base a sus correlaciones, los cuales podrían influir directa o indirectamente al desarrollo de las comunidades liquénicas.

Una vez obtenidos los valores de cobertura, frecuencia, valor de importancia (VI) y factor de tolerancia (Qi) de cada especie liquénica se procedió a realizar un Análisis de Cluster, para agrupar a las diferentes especies en conjuntos para determinar su tolerancia o sensibilidad a la contaminación atmosférica, de acuerdo a la similitud de los datos obtenidos.

Se utilizó la correlación de Spearman para evaluar la cobertura promedio de las diferentes especies liquénicas en los puntos de monitoreo con los datos de contaminación (promedios mensuales de concentraciones de NO₂, O₃ y PM₁₀), para determinar la respuesta específica de las especies a cada tipo de contaminante estudiado.

Para finalizar con la investigación se procedió a realizar un análisis geoestadístico en base a la desviación estándar de los datos obtenidos para obtener la amplitud de los rangos. Este tipo de clasificación de datos fueron útiles para realizar un mapeo de los resultados del IPA para ambas épocas de estudio, utilizando la herramienta de análisis espacial de Ponderación de la Distancia Inversa (IDW por sus siglas en inglés) del programa ArcGis 10,1.

3 Resultados

3.1 Zonificación geomorfológica y microclimática del eje metropolitano de Cercado

Se pudieron identificar cuatro zonas geomorfológicas en el Valle Central de Cochabamba, descritas en el mapa de Córdova (2013):

La primera zona geomorfológica y microclimática se la denomina Zona A, que llega a representar el Pie de Monte Alto. Dentro de esta zona se tiene la línea de isoterma de 1°C que representa la media de las temperaturas mínimas del mes más

frio de los últimos diez años "m" y cuenta con una precipitación media de 550 mm al año. Según el mapa de Córdova (2013) línea límite Oeste-Este con la Zona B es aproximadamente la Av. América.

La segunda zona geomorfológica es la Zona B, la cual representa el Pie de Monte Bajo. Según la interpolación de isotermas, esta zona presenta una temperatura "m" de 0 ° y una precipitación media anual que va desde los 500 a 550 mm. Según Córdova (2013), esta zona disminuye en pendiente y su límite Oeste-Este con la zona C llega a ser aproximadamente la Av. D'orbigni y el Rio Rocha.

La tercera zona, denominada Zona C es la Planicie Lacustre Alta, conformada por el conocido "casco viejo". En la parte norte de esta zona se cuenta con una temperatura "m" de 1°C y en la parte sur una temperatura "m" de -2°C. Esta zona presenta una precipitación de aproximadamente 450 mm al año. Según Córdova (2013), su límite Oeste- Este con la zona D es aproximadamente la Av. Capitán Víctor Ustariz, la Av. Aroma y la Av. 9 de Abril.

La cuarta zona llega a ser la Zona D, que representa la Planicie Lacustre Baja. En esta área se encuentra la línea de isotermas "m" de -2°C y una precipitación media anual de aproximadamente 450 mm anuales.

Por lo tanto se puede observar que existe una variación de temperaturas "m" de -2 °C (hacia el sur) y 1 °C (hacia el norte) a lo largo del transecto del valle. Esto refleja que las zonas "C" y "D", presentan mayor intensidad y duración de inversiones térmicas a lo largo del año y por ende mayor contaminación atmosférica, haciéndose más notorio en la época seca o época de invierno. En consecuencia esto genera variaciones temporales de la contaminación, debido a las diferencias de temperaturas en todo el año.

Respecto al análisis de isoyetas, se puede observar que no existe gran variabilidad de precipitación entre las distintas zonas, por lo tanto este parámetro no influye significativamente en la contaminación entre las zonas marcadas, ya que prácticamente es homogéneo en todo el eje metropolitano.

3.2 Selección de puntos de muestreo y toma de datos de comunidades líquénicas

Durante la inspección y observación realizada en las cuatro zonas se seleccionaron ocho parques (dos por cada zona geomorfológica), los cuales cumplieron con los criterios de selección establecidos en la metodología, encontrándose la especie arbórea Fresno (*Fraxinus americana*), como la especie mejor distribuida homogéneamente en todo el eje metropolitano de Cercado.

Se eligieron como puntos de monitoreo al Parque Tunari, como zona testigo, a los parques Fidel Anze y Lincoln (ubicados en la zona A); Demetrio Canelas y Ex

Combatientes (en la zona B); Vial y La Torre (en la zona C); Cementerio y Escuela (en la zona D).

De acuerdo al inventario de emisiones realizado por Pareja (2008), la contaminación del parque vehicular es responsable del 76% de las emisiones de gases contaminantes, por lo tanto, la intensidad de tráfico y tipo de vehículo tiene una fuerte influencia en la contaminación atmosférica y por ende en la distribución líquénica. Las fuentes de área y/o puntuales tiene una mayor concentración en la zona sur del eje metropolitano, ya que es en esta zona donde existe la mayor intensidad de tráfico vehicular mixto (flotas, camiones de carga, transporte público, transporte particular, etc.); además de contar con la presencia de las ladrilleras que tienen una fuerte influencia en lo que respecta a contaminación atmosférica.

Se lograron identificar 10 especies de líquenes epífitos en el forófito elegido, durante el muestreo realizado en la época seca del año 2015, representada por el mes de agosto (primera semana de dicho mes). Mientras que en la época húmeda se lograron identificar 11 especies de líquenes epífitos, durante los meses de febrero, marzo y abril del 2016 (primeras semanas de los meses indicados). A continuación se muestra un detalle de las especies identificadas.

Tabla 1. Especies de líquenes identificados en la época seca y húmeda y sus formas de crecimiento

Especie	Tipo de crecimiento	Época seca	Época húmeda
<i>Candelaria concolor</i>	Folioso	✓	✓
<i>Candelaria fibrosa</i>	Folioso	✓	✓
<i>Flavopunctelia flaventior</i>	Folioso	✓	✓
<i>Pyxine nubila</i>	Folioso	✓	✓
<i>Physcia pachyphylla</i>	Folioso	✓	✓
<i>Punctelia subrudecta</i>	Folioso	✓	✓
<i>Physcia undulata</i>	Folioso	✓	✓
<i>Phaeophyscia sciastra</i>	Folioso	✓	✓
<i>Lepraria ecorticata</i>	Crustáceo	✓	✓
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i>	Fruticuloso		✓
<i>Hyperphyscia syncolla</i>	Folioso		✓
<i>Physciella Chloantha</i>	Folioso	✓	
Total especies		10	11

Como se puede observar en la Tabla 1, todas las especies encontradas en la época seca corresponden al grupo de líquenes foliosos, excepto la especie *L.*

ecorticata, perteneciendo al grupo crustáceo. Mientras que en la época húmeda se encontraron 9 especies de crecimiento folioso, una especie de crecimiento crustáceo y una de fruticuloso.

Según varios autores la ciudad de Cochabamba presenta los niveles más altos de contaminación atmosférica durante la época de invierno o época seca del año y esto podría explicar una cobertura disminuida de los líquenes con únicamente 10 especies identificadas, en comparación a otros estudios en zonas tropicales, las cuales presentan una buena calidad del aire y aspectos ambientales que favorecen el desarrollo de los líquenes, como se puede observar en el estudio de Vergara & Paredes (2005), donde se hallaron alrededor de 325 especies liquénicas en la Isla de Santa Cruz-Galápagos.

3.3 Determinación de índices biológicos

En la Tabla 2 se puede observar el total de especies identificadas en cada época de estudio, el Valor de Importancia de cada especie (*VI*), y su factor de tolerancia/sensibilidad a la contaminación atmosférica (*Qi*). Cabe resaltar que en los meses de febrero, marzo y abril no se presentaron diferencias respecto al número de especies encontradas (*S*) en los puntos de monitoreo, por lo tanto solo se realizó una única interpretación de la época correspondiente y un promedio para el Valor de Importancia de cada especie.

Tabla 2. Lista de líquenes epífitos, Valor de Importancia y factor de tolerancia/sensibilidad de cada especie en ambas épocas estudiadas

ESPECIE	Época seca		Época húmeda	
	VI	Qi	VI	Qi
<i>Physciella chloantha</i>	0,45	7,25	-	-
<i>Candelaria concolor</i>	1,4	6,56	1,38	7,22
<i>Pyxine nubila</i>	1,32	6,56	1,34	7,22
<i>Physcia pachyphylla</i>	1,41	6,56	1,23	7,5
<i>Flavopunctelia flaventior</i>	1,18	6,56	1,15	7,22
<i>Phaeophyscia sciastra</i>	1,02	6,63	1,14	7,22
<i>Physcia undulata</i>	0,68	7,2	0,7	8
<i>Lepraria ecorticata</i>	0,58	7,2	0,91	7,25
<i>Punctelia subrudecta</i>	0,95	6,57	1,18	7,22
<i>Candelaria fibrosa</i>	0,36	8	0,6	8,2
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i>	-	-	0,11	10
<i>Hyperphyscia syncolla</i>	-	-	0,11	10

Como se puede observar en la Tabla 2, especies como *C. concolor*, *P. nubila* y *P. pachyphylla*, tuvieron un Valor de Importancia mayor, y un Q_i muy bajo, es decir que son las especies más frecuentes en todos los puntos de monitoreo, lo cual podría indicar que resultan ser las más tolerantes y adaptadas a la contaminación atmosférica. Al contrario, especies como *P. chloantha*, *H. syncolla* y *T. chrysophthalmus*, mostraron un Valor de Importancia muy bajo y un Q_i bastante elevado, indicando que tuvieron una frecuencia reducida. Esto puede significar que estas especies resultan ser las más sensibles a la contaminación.

A continuación se muestra la Riqueza (S) en cada punto de monitoreo, el Índice de Shannon y Wiener (H) y el Índice de Pureza Atmosférica (IPA).

Tabla 3. Resultados de Riqueza, Índice de Shannon y Wiener y el índice de Pureza Atmosférica para cada punto de monitoreo en ambas épocas estudiadas

Puntos de monitoreo	Época seca			Época húmeda		
	Riqueza (S)	Índice de Shannon y Wiener (H)	Índice de Pureza Atmosférica (IPA)	Riqueza (S)	Índice de Shannon y Wiener (H)	Índice de Pureza Atmosférica (IPA)
Parque Tunari	10	2,290	23,01	11	2,570	30,31
Parque Fidel Anze	7	1,724	16,07	8	2,456	25,27
Parque Lincoln	8	2,101	18,88	9	2,692	25,68
Parque Demetrio Canelas	9	2,160	22,95	9	2,582	29,3
Parque Ex Combatientes	6	1,720	15,78	8	1,916	20,06
Parque Vial	8	2,015	15,22	9	2,355	22,82
Parque La Torre	6	1,688	15,77	7	1,812	18,25
Parque Escuela	7	1,891	16,56	7	1,686	16,09
Cementerio	7	1,900	15,84	6	1,520	15,76

Como se puede observar en la Tabla 3 en cuanto a la riqueza, se puede ver que la mayor cantidad de especies líquénicas se encuentran distribuidas en el Parque Tunari, conteniendo a todas las especies encontradas en los demás sitios de muestreo, identificándose 10 especies de líquenes en la época seca y 11 en la época

húmeda. Otro aspecto importante fue el gran número de especies encontradas en el Parque Demetrio Canelas, lo cual puede indicar una buena calidad del aire en esta zona. Por otro lado, se pudo ver que lugares como el Cementerio, Parque Escuela y Parque La Torre, presentan un número reducido de especies líquénicas; por lo tanto esto podría indicar una alta influencia de la contaminación y/o el clima sobre estas especies.

Viendo el Índice de Shannon y Wiener, Pla (2006) indica que si una comunidad de especies es muy homogénea, el grado de incertidumbre será más bajo que si todas las especies fueran igualmente abundantes. Por lo tanto podemos ver que en la época seca, existe una buena distribución de abundancias en el Parque Tunari, dando como resultado una alta diversidad y una comunidad homogénea. Al contrario los Parques La Torre y Ex Combatientes, presentaron la menor diversidad líquénica en la época seca, lo cual pudo estar influenciada por la contaminación, el clima o la competencia de especies, ya que especies como *C. concolor*, *P. pachyphylla*, *P. nubila* y *P. sciastra*, mostraron tener elevadas coberturas, por lo que desplazaron el desarrollo de otras especies más sensibles. Por otro lado en la época húmeda la mayor diversidad líquénica se observó en el Parque Lincoln, Demetrio Canelas y Tunari, los cuales mostraron tener las diversidades más altas respectivamente, y una estabilización de la contaminación en esta época, pudo haber homogeneizado la cobertura líquénica respecto a la época seca. Sin embargo en los Parques Cementerio y Escuela, se notó una menor diversidad, y esto pudo haber sido influenciado por los cambios meteorológicos entre épocas.

Haciendo hincapié en el IPA, a continuación se presenta un gráfico de columnas que diferencian los Índices de Pureza Atmosférica entre la época húmeda y la seca. Cabe resaltar que se realizó un promedio entre los meses de febrero, marzo y abril, ya que no existieron diferencias significativas entre dichos meses en los puntos de muestreo; por lo tanto para motivos de comparación entre ambas épocas, se tomó en cuenta el promedio para la época húmeda y el dato del mes de agosto para la época seca.

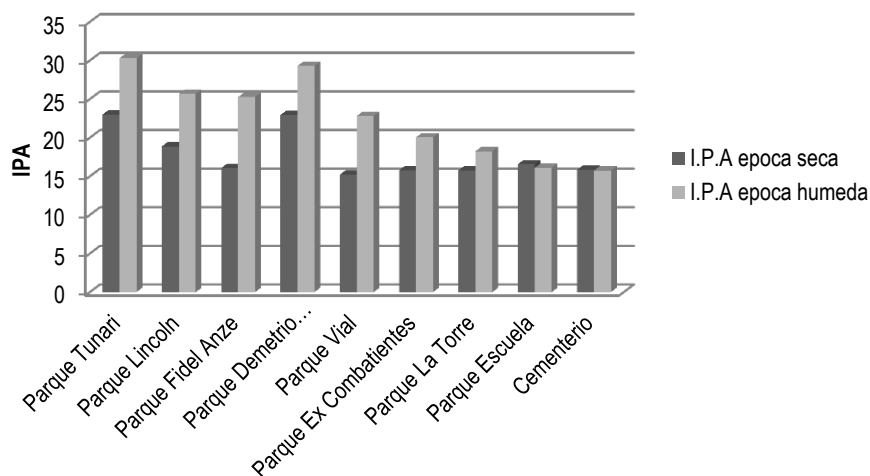


Figura 1: Comparación de los IPA's entre la época seca y húmeda

Como se puede evidenciar en la Figura 1;, el punto de control o zona testigo (Parque Tunari), resulta ser un sitio que no presenta indicios de contaminación, ya que espacialmente presentó los niveles mas altos de Índice de Pureza Atmosferica. Los factores climáticos y la baja (casi nula) intensidad vehicular influyen mucho en el desarrollo de varias especies de líquenes en este sitio.

El Parque Demetrio Canelas presentó un valor alto de IPA, lo cual se puede deber a que el tráfico vehicular es bajo, además de ser una zona residencial, sin actividades comerciales que puedan ser consideradas como fuentes fijas de contaminación. Este valor elevado de IPA refleja una buena calidad del aire, y esto se debe también a que en la zona existe una buena dispersión de los contaminantes por una buena ventilación y poca edificación.

Por el contrario los parques que presentaron una contaminación elevada durante la época seca, de acuerdo a este índice, resultaron ser: Cementerio, Parque la Torre, Vial y Ex Combatientes; donde el clima, el tráfico vehicular y la actividad comercial influyen enormemente en el resultado. Además como se evidenció en la zonificación, el efecto de inversión térmica llega a cubrir las zonas geomorfológicas y microclimáticas "C", "D" y parte de la "B", de acuerdo a la isoterma de la temperatura "m".

Por otra parte, los parques que presentaron un IPA bajo en la época húmeda fueron: Cementerio, Parque Escuela y La Torre. Si se observa la Figura 1;, se puede notar un leve aumento de la calidad del aire del Parque La Torre; mientras que los Parques del Cementerio y Escuela, prácticamente se mantuvieron constantes. Esto pudo deberse a los factores climáticos que se presentaron en Cochabamba entre los años 2015-2016, ya que según Luján (2016), entre estos años Cochabamba

experimentó los niveles más altos de sequía registrados en los últimos años y la precipitación no fue suficiente comparada con años anteriores, por los efectos del fenómeno del Niño y el cambio climático.

Otro hecho importante de destacar son los eventos de contaminación intensa ocurridos en la ciudad de Cochabamba, entre los años 2015-2016, como incendios ocurridos en el Parque Tunari, en los totorales de la Laguna Alalay y en el botadero de K'ara K'ara, afectando en gran magnitud al eje metropolitano (Los Tiempos, 2016). Por último, Giordani & Brunialti (2015), señalan que la distribución de líquenes epífitos se ve afectada en gran magnitud ante eventos críticos de cargas y niveles de contaminación, esencialmente por el nitrógeno, lo que podría explicar los bajos valores del IPA en esas zonas.

3.4 Determinación de parámetros climáticos y concentraciones de contaminantes atmosféricos

Al no encontrarse diferencias significativas de variabilidad entre los meses estudiados se realizó un promedio de los tres meses, pertenecientes a la época húmeda, teniendo los siguientes datos como restado, tanto de contaminantes atmosféricos como de parámetros climáticos.

Como se observa en la Tabla 4, podemos ver que existe una variación espacial de los tres contaminantes atmosféricos medidos. En cuanto al O_3 , se puede notar que la zona sur presenta niveles mucho más bajos que la zona norte. Por el contrario se puede observar que las concentraciones de NO_2 y PM_{10} resultan ser bajas en la zona norte y elevada en la zona sur.

Según Luján (2016), respecto a la dinámica de formación del O_3 , éste requiere de una cierta relación entre la cantidad de COV's, NO_2 y radiación solar, lo cual se da de mejor manera en la periferia, ya que en esta zona existe una menor cantidad de polvo o material particulado, que hace que se dé una mayor intensidad de radiación solar.

Hablando sobre el NO_2 y el PM_{10} se puede observar que estos contaminantes se encuentra en mayor concentración en la zona sur, debido a que en esta área se halla la mayor cantidad de vehículos (especialmente en el casco viejo y el sector de la cancha). Otro hecho que aumenta la concentración de PM_{10} resulta ser la actividad de las ladrilleras que se desarrolla en la zona sur del municipio de Cochabamba.

Tabla 4. Promedio trimestral de datos de contaminación atmosférica y parámetros meteorológicos para la época húmeda

Parques	Contaminantes atmosféricos			Datos meteorológicos					
	NO ₂ (µg/m ³ aire)	O ₃ (µg/m ³ aire)	PM ₁₀ (µg/m ³ aire)	Humedad Relativa (%)	Precipitación total (mm)	Temperatura media (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Temperatura mínima del mes más frío "m" (°C)	Amplitud térmica (°C)
Tunari	5,83	17,50	30,47	48,27	129,9	20,33	2,57	0,6	17,0
Lincoln	15,83	18,95	31,63	48,13	128,7	20,37	2,63	0,8	16,9
Fidel Anze	21,20	18,07	33,47	48,03	128,6	20,37	2,47	0,6	17,0
Demetrio Canelas	22,09	17,37	36,07	46,57	141,1	21,93	2,03	1,1	16,8
Vial	25,98	16,87	36,30	47,93	132	20,43	2,3	0,6	17,0
Ex. Combatientes	30,27	15,60	38,77	46,5	141,4	21,93	1,97	1,0	16,8
La Torre	27,28	14,87	40,17	46,97	129,5	21,73	2,2	0,2	17,1
Escuela	33,98	13,35	43,70	46,73	133	21,77	1,87	0,1	17,2
Cementerio	38,70	8,87	49,97	52,77	122,1	20,6	1,87	-0,8	17,6

Haciendo referencia a los parámetros meteorológicos se puede observar en la Tabla 4 que no se presentan diferencias muy significativas de los datos de precipitación, temperatura media y humedad relativa entre las zonas de monitoreo, debido a que el área de estudio o los puntos de muestreo no presentaron distancias muy grandes, para comparar diferencias de dichos datos. Sin embargo se notaron diferencias en la velocidad del viento, donde vientos relativamente más veloces se dan en la zona norte del eje metropolitano, lo cual puede explicar una buena dispersión de los contaminantes en esta zona. Otro hecho importante de destacar es la dirección del viento que varía entre 180 a 135°, es decir que los vientos en promedio tienen una dirección Nor-Oeste, transportando la contaminación hacia Quillacollo.

Respecto a la temperatura mínima del mes más frío "m" y la amplitud térmica, se pueden observar diferencias significativas entre los puntos de monitoreo. Cabe mencionar que ambos datos describen de mejor manera la inversión térmica que se da en el Valle. Por lo tanto se puede comprobar que en la zona sur (zonas C y D) se tienen menores temperaturas y por ende mayor grado de inversión térmica, dando lugar a mayor contaminación atmosférica.

Como se indicó en la metodología se calcularon tres ICA's diferentes, basados en las concentraciones de O₃, NO₂ y PM₁₀ y sus valores límite referenciales (medias anuales), establecidos por la OMS (60, 40 y 20 µg/m³ respectivamente). A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 5. Promedio de los índices de Calidad de Aire (ICA's) para la época húmeda

PARQUES	ICA1 (Norma boliviana)	ICA 2	ICA 3
Tunari	152,33	40,10	65,36
Lincoln	158,17	58,27	76,46
Fidel Anze	167,33	64,36	83,47
Demetrio Canelas	180,33	65,87	88,14
Vial	181,50	69,10	91,49
Ex. Combatientes	193,83	72,34	98,49
La Torre	200,83	69,60	97,92
Escuela	218,50	74,33	108,57
Cementerio	249,83	70,24	120,45

Como se puede observar en la Tabla 5, espacialmente los puntos de monitoreo ubicados en la zona sur presentan valores más elevados de ICA, respecto a los puntos que se encuentran más al norte. Este Índice indica que valores elevados de ICA denotan una calidad de aire menor y según la Normativa boliviana, estos valores varían desde condiciones insalubres para la población sensible a muy insalubre (151-200 y 201-300 respectivamente).

3.5 Análisis de datos e interpretación

Como se mencionó en la metodología se realizaron correlaciones simples de Spearman entre el IPA con todas las variables estudiadas (contaminantes atmosféricos, parámetros meteorológicos e ICA's). A continuación se muestra una tabla resumen de todas las correlaciones estadísticas obtenidas.

Tabla 6. Correlaciones estadísticas entre el IPA vs parámetros estudiados con un nivel de confianza del 95%

Correlaciones	Prueba	Rho	P-value
Contaminantes	IPA vs NO ₂	-0,933	0
	IPA vs O ₃	0,867	0,002
	IPA vs PM ₁₀	-0,95	0
	IPA vs %Hum	0,067	0,865
	IPA vs PrecTotal	0,167	0,668
Parámetros meteorológicos	IPA vs Temp	-0,412	0,271
	IPA vs Velviento	0,767	0,016
	IPA vs Altura	0,633	0,067
	IPA vs Amplitud Term	-0,681	0,043
	IPA vs Temp min del mes más frío	0,712	0,031
ICA's	IPA vs ICA1	-0,95	0
	IPA vs ICA2	-0,867	0,002
	IPA vs ICA3	-0,933	0

Como se observa en la Tabla 6 existen buenas correlaciones de los contaminantes y el desarrollo de los líquenes, la cual varía de 0,83 a 0,967, con un $P < 0,005$. Por una parte se tienen correlaciones negativas entre el IPA y los contaminantes de NO₂ y PM₁₀, lo cual significa que a mayor concentración de estos contaminantes, menor es la calidad del aire respecto a los líquenes; mientras que el O₃ presenta una correlación positiva, indicando que a mayor concentración de este contaminante existe un mayor desarrollo de las comunidades líquénicas, conteniendo un principio erróneo, ya que según Pellegrini & Bertuzzi (2014), la

comunidad líquénica puede presentar una tolerancia a altas concentraciones de ozono troposférico, debido a que estos organismos contienen ciclos de hidratación-deshidratación, que liberan enzimas ante el estrés oxidativo de este contaminante

El NO₂ tienen una alta influencia en el desarrollo de los líquenes, debido a que son fuertes catalizadores de la peroxidación de su membrana lipídica, causando un daño en la membrana celular (Conti & Cecchetti, 2001). Por otra parte, Frietas & Costa (2011) señalan que el material particulado tiene una importante influencia negativa en la distribución de líquenes en áreas urbanas, ya que varios contaminantes atmosféricos pueden ser adsorbidos en su superficie, especialmente elementos traza metálicos. Esto podría explicar la mayor correlación del PM₁₀ promedio (Rho=-0,95 y P=0,000) con la diversidad líquénica, ya que estos organismos resultan ser buenos bioindicadores integrales de la calidad del aire, es decir que denotan el efecto global de los contaminantes atmosféricos.

Respecto a las correlaciones con los parámetros meteorológicos, podemos observar en la Tabla 6, que existen correlaciones intermedias a buenas con la velocidad del viento, la altura, amplitud térmica y temperatura mínima del mes más frío (m), en el periodo de estudio. La razón por la cual el viento y la altura mostraron una buena correlación positiva con el IPA, se debe a que la distribución líquénica se encuentra extensamente ligada a parámetros geomorfológicos y microclimáticos que condicionan la contaminación.

Se puede observar que existe una excelente correlación entre el IPA con todos los ICA's obtenidos, es decir que el IPA nos ofrece una buena bioindicación de la calidad del aire espacialmente. Pero se puede observar que el Índice de Pureza Atmosférica presenta mayor correlación con el Índice de Calidad del Aire 1, utilizado en la norma boliviana (Rho=0,95 y P=0,000), esto se debe a que este Índice de Calidad de Aire está basado en la concentración del contaminante máximo (en este caso el PM₁₀) y como se explicó anteriormente este contaminante tiene un efecto acumulativo, por lo que es uno de los contaminantes que causa mayores daños tanto en los líquenes como en la salud de las personas.

Para probar dichas correlaciones causales directas e indirectas, se realizó un "Path Analysis", el cual relaciona todas las correlaciones entre variables y da como resultado una matriz, indicando las influencias de las variables sobre el IPA. En el siguiente diagrama se puede observar los resultados obtenidos.

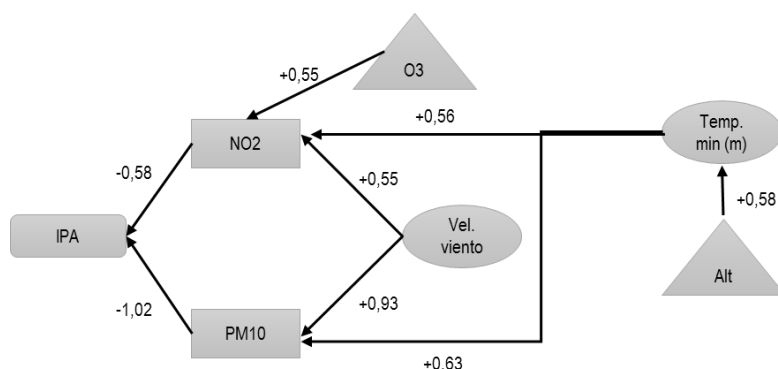


Figura 2: Diagrama de causalidad obtenida a través del "Path Analysis"

Como se puede observar en la Figura 2: se obtuvieron dos tipos de variables: las variables directas, representadas por los cuadrados (NO₂ y PM₁₀); y variables indirectas, representadas por los círculos (O₃, velocidad del viento y temperatura mínima del mes más frío) y el triángulo (altura). Cabe mencionar que la altura es una variable exógena, es decir que no recibe influencia de otras variables no estudiadas. También se puede ver que las flechas están representadas por un valor numérico, indicando una mayor o menor dependencia y un signo que representa el tipo de relación con la variable estudiada (IPA).

La Figura 2: prueba la relación directa que existe entre los contaminantes (NO₂ y PM₁₀) y el IPA, mientras que el O₃ no presentó una relación significativa en la matriz, y por lo tanto este contaminante no influye directamente sobre el desarrollo de los líquenes. Por otra parte variables como la velocidad del viento, el ozono y la temperatura mínima del mes más frío, presentan relaciones indirectas, ya que estas variables alteran la distribución de los contaminantes (NO₂ y PM₁₀), y por ende al desarrollo de las comunidades liquénicas. Respecto a la altura, se observa que esta variable únicamente influye a la temperatura mínima del mes más frío y esto se observa en su valor (+0,58), indicando que a menor altura se tiene menor IPA, reflejando el efecto de la inversión térmica, ya que a bajas temperaturas, se da con mayor intensidad este fenómeno.

Se realizó un análisis Cluster para determinar e identificar a las especies sensibles y tolerantes a la contaminación global. A continuación se presenta el resultado del análisis de Cluster.

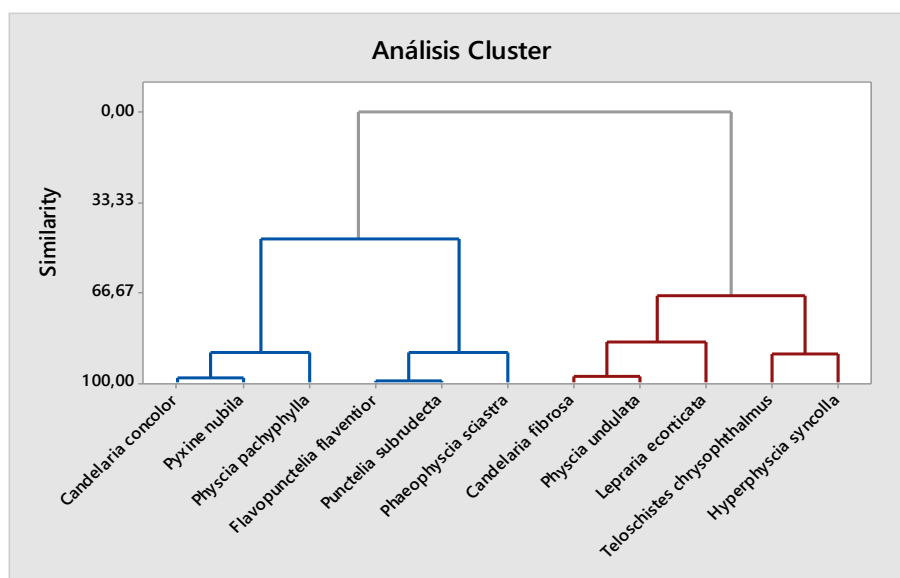


Figura 3: Análisis Cluster para la identificación de especies de líquenes sensibles y tolerantes a la contaminación atmosférica.

Como se observa en la Figura 3;, se formaron dos conjuntos o grupos de especies relacionados entre sí (el Cluster Rojo y el Cluster Azul). Cabe mencionar que el grupo azul, representa a las especies tolerantes a la contaminación, ya que estas especies se presentaron con mayor frecuencia en los puntos de monitoreo, presentando una cobertura casi homogénea en todo el eje metropolitano de la ciudad de Cochabamba, mientras que el grupo rojo, representa a las especies sensibles a la contaminación, ya que presentaron una frecuencia reducida y su presencia se vio limitada en algunos puntos de monitoreo.

Como se puede ver en la figura anterior en cada Cluster se formaron dos subgrupos, según la similitud de datos. Por lo tanto se clasificaron a las comunidades líquénicas de la siguiente manera: "Comunidad tolerantes a la contaminación", conformada por *C. concolor*, *P. nubila* y *P. pachyphylla*; "Comunidad con tolerancia media a la contaminación", formada por *F. flaventior*, *P. subrudecta* y *P. sciastra*; "Comunidad sensible a la contaminación", encontrándose las especies de *C. fibrosa*, *P. undulata* y *L. ecorticata*; y la "Comunidad altamente sensible a la contaminación", conformada por *H. syncolla* y *T. chrysophthalmus*. Cabe mencionar que las últimas dos especies únicamente se encontraron en la zona testigo, es por esto que al tener una presencia y frecuencia limitada, ocupan en el último grupo formado.

Según Perlmutter (2010), especies como *C. concolor*, *P. pachyphylla*, *F. flaventior* y géneros de *Pyxine*, y *Punctelia*, son especies de macrolíquenes conocidas como

tolerantes a la contaminación. Por lo tanto es normal que este tipo de géneros y/o especies colonicen forófitos, además de encontrarse en mayor abundancia en ciudades contaminadas. Por otra parte géneros de *Hyperphyscia*, *Teloschistes* y *Lepraria* resultan ser especies sensibles a la contaminación atmosférica, especialmente ante concentraciones elevadas de SO₂ (National Park Service, 1983; Wisconsin Nature, 2016), es por esta razón que las especies de *H. syncolla* y *T. chrysophthalmus*, solo se encontraron en la época húmeda, específicamente en el punto de muestreo que no presentó indicios de contaminación (Parque Tunari). En el estudio de Bardelás (2012), se demostró que las especies *C. fibrosa* y *P. undulata*, entre otras especies, resultan ser sensibles a la contaminación atmosférica, comprobando el resultado anterior.

Como se mencionó en la metodología se realizó una correlación de Spearman de la cobertura promedio de cada especie con cada contaminante estudiado para tener una idea de la sensibilidad o tolerancia específica de todas las especies, con los contaminantes estudiados.

Se obtuvo como resultado que únicamente tres especies de líquenes presentaron correlaciones significativas (P-value<0,05) con el PM₁₀ y NO₂. La especie *Flavopunctelia flaventior*, presentó correlaciones negativas con ambos contaminantes, es decir que mayores concentraciones, ocasionan una menor cobertura de esta especie en los sitios de muestreo. La especie *Candelaria concolor* solo presentó correlación negativa con el NO₂ (Rho=-0,67), esto podría indicar que el NO₂ presenta un efecto sobre la cobertura de esta especie, aunque fue denominada tolerante. En efecto *C. concolor* y *F. flaventior* si bien son especies tolerantes a la contaminación global, presentaron comportamientos en su disminución de coberturas frente a estos contaminantes. Por otra parte, *Candelaria fibrosa* presentó una correlación negativa con el PM₁₀ (Rho=-0,84), siendo una especie sensible a la contaminación global, lo cual es coherente a los resultados obtenidos anteriormente.

Pasando al mapeo del IPA, como se explicó en la metodología, el número de rangos obtenidos se basó en la desviación estándar de los datos, obteniéndose 5 rangos de clasificación para la calidad del aire en ambas épocas estudiadas, consiguiéndose los siguientes mapas como resultados.

Como se puede observar en la Figura 4;, existe un descenso del área correspondiente a "Muy mala" calidad del aire, entre el transcurso de la época seca a la época húmeda, mientras que hubo un aumento de las áreas de "Buena" y "Muy buena" calidad del aire entre ambas épocas. Otro aspecto importante que se pudo notar es la estabilización de la contaminación atmosférica haciendo que las áreas de calidad del aire sean aproximadamente homogéneas entre sí en la época húmeda. Esto confirma el hecho de que tanto las condiciones climáticas como el grado de

contaminación tienen influencia en el desarrollo de comunidades líquénicas y por ende en la calidad del aire.

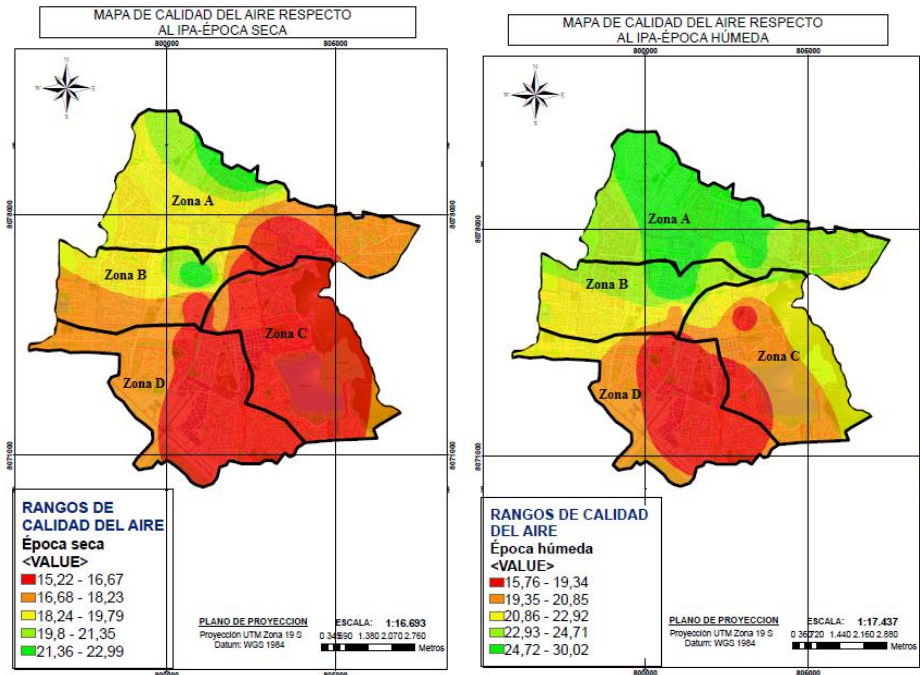


Figura 4: Mapas de calidad del aire, respecto al IPA en el eje metropolitano del municipio de Cercado en época seca (izquierda) y en época húmeda (derecha).

Algo importante de destacar que se puede observar en la figura anterior, es la alta disminución de la contaminación en las zonas geomorfológicas y microclimáticas, ya que en la época seca los niveles bajos de calidad del aire ocupaban las zonas "D", "C", parte de la "A" y "B", mientras que en la época húmeda la baja calidad de aire se limitó a las zonas "C" y "D". En consecuencia las zonas "D" y "C", resultan ser las áreas que presentan una menor calidad del aire en ambas épocas del año, lo cual se debe principalmente al elevado nivel de tráfico vehicular, fuentes de área que se encuentran por estas zonas y las condiciones climáticas que no favorecen a la dispersión de la contaminación.

4 Conclusiones

A través de la zonificación, se logró identificar cuatro zonas diferenciadas por la geomorfología, precipitación y temperatura mínima del mes más frío. Se vio que el clima es un factor que condiciona directamente a la contaminación atmosférica,

influyendo en su dispersión y concentración, respecto a la altura, y la temperatura mínima del mes más frío (m).

Se logró comprobar que los líquenes se ven afectados directamente por contaminantes atmosféricos, ya que la distribución liquénica varía según las concentraciones de contaminantes específicos.

Según el análisis Cluster, se logró identificar cuatro comunidades de líquenes, diferenciadas por su sensibilidad a la contaminación atmosférica: la "comunidad tolerante", conformada por las especies *Candelaria concolor*, *Pyxine nubila* y *Physcia pachyphylla*; la "comunidad con tolerancia media", conformada por *Flavopunctelia flaventior*, *Punctelia subrudecta* y *Phaeophyscia sciastra*; la "comunidad sensible", conformada por *Candelaria fibrosa*, *Physcia undulata* y *Lepraria ecorticata*; y la "comunidad altamente sensible", conformada por *Teloschistes chrysophthalmus* e *Hyperphyscia syncolla*.

Los análisis estadísticos mostraron que los líquenes resultan ser tolerantes al O₃, mientras que tienen un efecto negativo a altas concentraciones de NO₂ y PM₁₀. A través de las correlaciones estadísticas se vio que *Flavopunctelia flaventior* resulta ser una especie algo sensible a altas concentraciones de PM₁₀ y NO₂, mientras que *Candelaria concolor* es sensible al NO₂ y *Candelaria fibrosa* a elevadas concentraciones de PM₁₀.

Se obtuvo como resultado que el Índice de Calidad del Aire 1 (utilizado por la normativa boliviana), es un buen parámetro para medir las condiciones de calidad del aire, ya que el PM₁₀, presenta un efecto integrado o acumulativo sobre los organismos vivos.

A través del Índice de Pureza Atmosférica (IPA), se comprobó que los líquenes son una buena herramienta para medir la calidad del aire integral, ya que son afectados directamente por la contaminación, presentando variaciones en su distribución. Se verificó que la zona sur resulta ser un área con mayor contaminación, respecto a la zona norte, sobre todo por el efecto de la inversión térmica que se presenta en el valle de Cochabamba.

5 Agradecimientos

Por toda la ayuda incondicional y siempre de buena fe, se agradece al Dr. Eduardo Morales, curador del Herbario Criptogámico de la Universidad Católica Boliviana por la identificación de género y especies de líquenes recolectados para este estudio, además de todos los consejos brindados para iniciar este trabajo de investigación. Por otra parte, se agradece al PhD. Paolo Giordani de Italia, reconocido liquenólogo a nivel mundial, por su buena disposición para guiar y recomendar muchos aspectos teóricos y prácticos para este artículo. Por último se

agradece al Dr. Melicio Siles y a la Mgr. Estela Herbas, por su buena disposición en el apoyo de la parte estadística.

Referencias Bibliográficas

- [1] Alcazar, F. (2013). El método fitosociológico. Murcia.
- [2] Anze, R. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. REDESMA, 54-74.
- [3] Asta, J. (2002). Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality. En P. L. Nimis, *Monitoring with lichens-Monitoring lichens* (págs. 273-279). Italia: Kluwer Academic Publishers.
- [4] Bardelás, A. (Diciembre de 2012). Tesis. Desarrollo y puesta a prueba de un nuevo método para utilizar líquenes como bioindicadores de contaminación.
- [5] Canseco, Á. (2004). "Comunidades de Líquenes: Indicadoras del Nivel de Calidad del Aire en la ciudad de La Paz, Bolivia". Tesis de licenciatura, 91. La Paz, Bolivia.
- [6] Castell, E. D. (2011). Líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en Montevideo-Uruguay. Líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en Montevideo-Uruguay. Montevideo, Uruguay.
- [7] Conti, M., & Cecchetti, G. (2001). Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment-a review. *Environmental Pollution*, 471-492.
- [8] Córdova, K. L. (17 de Diciembre de 2013). Caracterización de la vegetación urbana en la cuenca central de Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*, 6, 94-121.
- [9] Echague, G. (06 de Diciembre de 2001). *Atmósfera*. Recuperado el 22 de Febrero de 2015, de conama.es: www.conama.es
- [10] Estrada, V. h., & Monje Nájera, J. (18 de Agosto de 2011). El uso de líquenes como biomonitores para evaluar el estado de la contaminación atmosférica a nivel mundial. *Biocenosis*, vol. 25, 51-67.
- [11] Frietas, M., & Costa, N. (2011). Lichens as bioindicators of atmospheric pollution in Porto, Portugal. *Journal of biodiversity and ecological science*.
- [12] García, L., & Rubiano, L. (1984). Comunidades de Líquenes como Indicadoras de niveles de Calidad de Aire en Colombia. *Contaminación Ambiental*, 79-90.
- [13] Giordani, P. (2007). Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution*, 317-323.

- [14] Giordani, P., & Brunialti, G. (2015). Sampling and Interpreting Lichen Diversity Data for Biomonitoring Purposes. En U. D., Recent Advances in Lichenology-Modern Methods and Approaches in Biomonitoring and Bioprospection (págs. 20-46). Italia.
- [15] Gobierno Municipal de Cochabamba. (2014). cochabamba.gob.bo. Recuperado el 22 de Junio de 2015, de Plan Estratégico de Desarrollo del Municipio del Cercado de Cochabamba: http://www.cochabamba.gob.bo/public/descargas/Resumen_Plan_estrategico.pdf
- [16] Gómez, H., Fernández, R., & Galarraga, F. (2013). Líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica por Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP). Revista de la facultad de Ingeniería U.C.V., Vol. 28, 45-58.
- [17] Kerkhoff. (20 de Enero de 2010). biology.kenyon.edu. Recuperado el 02 de Septiembre de 2016, de Measuring biodiversity of ecological communities: <http://biology.kenyon.edu/courses/biol229/diversity.pdf>
- [18] LeBlanc, F., & De Sloover, J. (1970). Relation between industrialization and the distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. Canadian Journal of Botany, 1485-1495.
- [19] Los Tiempos. (04 de Abril de 2016). Crímenes ambientales en Cochabamba. Los Tiempos.
- [20] Luján, M. (16 de Febrero de 2016). Condiciones atmosféricas en Cochabamba. (N. G. Vargas, Entrevistador)
- [21] Moreno, C. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. Zaragoza: Cytel.
- [22] Navarro, G., & Ferreira, W. (2009). Mapa Biogeográfico de Bolivia. Mapa Biogeográfico de Bolivia. Bolivia.
- [23] Nimis, L. (1999). Linee-guida per la bioindicazione degli effetti dell'inquinamento tramite la biodiversità dei licheni epifiti. Biomonitoraggio de lla qualita dell aria, 267-277.
- [24] Nimis, P. (2002). Monitoring with lichens-Monitoring lichens. Roma.
- [25] Osuna, F. P., & Osuna Martínez, C. (2011). Biomonitores de la contaminación costera con referencia a las costas mexicanas: una revisión sobre los organismos utilizados. Hidrobiológica, 229-238.
- [26] Pareja, A. (2008). Inventario de las emisiones atmosféricas contaminantes de la ciudad de Cochabamba. Acta Nova, 344-373.

- [27] Pellegrini, E., & Bertuzzi, S. (2014). Ozone tolerance in lichens: a posible explanation from biochemical to physiological level using *Flavopalmeria caperata* as test organism. *Journal of Plant Physiology*, 1514-1523.
- [28] Perlmutter, G. (2010). Bioassessing air pollution effects with epiphytic lichens in Raleigh, North Carolina, U.S.A. *American Briological and Lichenological Society*, 39-50.
- [29] Pla, L. (2006). Biodiversidad: Inferencia basada en el Índice de Sahannon y la Riqueza. Scielo.
- [30] PROMIC. (2011). Proyecto de Manejo Integral de la Cuenca del Río Rocha. Proyecto de Manejo Integral de la Cuenca del Río Rocha. Cochabamba, Bolivia.
- [31] Rubiano, J. L. (2006). Delimitación de áreas de isocontaminación atmosférica en el campus de la Universidad Nacional de Colombia mediante el análisis de bioindicadores (Líquenes epífitos). *Contaminación Ambiental*.
- [32] Saurina, C., Barceló, M. A., & Sáez, M. (1999). Efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica sobre la mortalidad. Resultados del proyecto EMECAM en la ciudad de Barcelona, 1991.95. *Salud pública*.
- [33] Silva, G. V., Castro Mejía, G., & Gonzáles Mora, I. (04 de Mayo de 2006). *izt.uam.mx*. Recuperado el 02 de Mayo de 2015, de Bioindicadores como herramientas para determinar la calidad el agua:
<http://www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n60ne/Bio-agua.pdf>
- [34] Steubing, L., & Fangmeier, A. (1992). *Dr. W. Junk Publishers*. Recuperado el 06 de Marzo de 2015, de *Monitoring of Air Pollutants by Plants*.
- [35] Vergara, D., & Paredes, T. (2005). Líquenes como bioindicadores de contaminación en el sitio de disposición final desechos sólidos, Isla Santa Cruz, Galápagos. Recuperado el 13 de Mayo de 2016, de *centrourbal.com*:
http://www.centrourbal.com/sicat2/documentos/30_2006511755_R6P11-03B-dt3-spa.pdf
- [36] *Wisconsin Nature*. (16 de Mayo de 2016). *dnr.wi.gov*. Recuperado el 22 de Julio de 2016, de Gold-eye Lichen (*Teloschistes chrysophthalmus*):
<http://dnr.wi.gov/topic/EndangeredResources/Plants.asp?mode=detail&SpecCode=NLLEC4W020>