

USO DE LÍQUENES COMO BIOINDICADORES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE SAN LUIS, ARGENTINA

Rubén LIJTEROFF, Luis LIMA y Betzabé PRIERI

Facultad de Química, Bioquímica y Farmacia. Universidad Nacional de San Luis. Chacabuco y Pedernera. 1^{er} piso, oficina 3. (5700). San Luis, Argentina. rlijte@unsl.edu.ar

(Recibido noviembre 2007, aceptado octubre 2008)

Palabras clave: bioindicadores, contaminación aérea, índice de pureza atmosférica

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la calidad del aire urbano en la ciudad de San Luis, usando las comunidades de líquenes como bioindicadores. Se tomaron 6 áreas en el centro de la ciudad y un área control en la ciudad de Juana Koslay, ubicada a 6 km al este. Para determinar gradualidad en los niveles de contaminación, se utilizó el Índice de Pureza Atmosférica (IPA). Este valor indica indirectamente la cobertura de los líquenes en la zona de muestreo y directamente la diversidad de especies. Se calcularon los índices de diversidad de Shannon (H), la equitatividad (J) y riqueza (S). Los valores más bajos en el IPA se encontraron en la ciudad de San Luis y los más altos en el área control en Juana Koslay. La ausencia casi total de líquenes en la ciudad de San Luis refleja la baja calidad del aire en el espacio urbano y la eficacia de los líquenes como bioindicadores de la contaminación aérea.

Key words: bioindicators, index of atmospheric purity, air pollution

ABSTRACT

Air quality was assessed in San Luis City by using lichens as bioindicators. Six sites in San Luis City and one site in a control area, Juana Koslay, a small town six kilometers to the East, were evaluated by using the Index of Atmospheric Purity (IAP) which measures indirectly the coverage of lichens in the sampling zone and directly the diversity of species. Shannon (H), equity (J) and richness (S) indexes were also measured. The lowest IAP were detected in San Luis City, the highest IAP was detected in Juana Koslay. Therefore urban areas are more polluted than peripheral ones. The extremely low frequency of lichens appearance in San Luis City indicated the low quality of air in these urban areas and the efficacy of lichens as bioindicators of air contamination.

INTRODUCCIÓN

Un organismo se considera bioindicador cuando presenta alguna reacción que puede ser identificada frente a diferentes grados de alteración del medio, por ejemplo frente a la contaminación del aire. Muchas especies son incapaces de adaptarse ecológica o genéticamente a la condición ambiental alterada, de modo que su ausencia es, de hecho, un indicio del problema. Su comportamiento ante dichas condiciones difiere del natural en aspectos tales como hábito, fisiología, demografía y relaciones con otros organismos (García y Rubiano 1984).

Se conocen numerosos organismos que pueden ser utilizados como bioindicadores; se incluyen especies de plantas vasculares, briofitas, algas, líquenes, hongos, animales invertebrados y animales vertebrados. En el caso de la contaminación atmosférica, se consideran buenos bioindicadores aquellos organismos que presentan sensibilidad a los contaminantes aéreos, una amplia distribución en el territorio en estudio y una gran longevidad (Ariño-Vila *et al.* 1997).

Los líquenes son asociaciones simbióticas entre un alga (fotobionte) y un hongo (micobionte) de cuya interacción se origina un talo estable, con estructura y fisiología específicas. Las algas encontradas pueden ser clorofitas o cianofitas y los hongos que intervienen en la asociación son *Ascomycetes*, *Basidiomycetes* o *Phicomycetes* (Alexopoulos y Mims 1985). Poseen características particulares como carecer de raíz y de sistemas de conducción, no poseer estructuras selectivas o protectoras del medio externo como cutículas o epidermis, por lo que se vuelven vulnerables a variaciones ambientales. Son organismos autótrofos, su crecimiento es muy lento, poseen una amplia distribución desde los polos al ecuador, y crecen en las superficies de los más diversos sustratos inertes u orgánicos. Los líquenes poseen órganos apendiculares cuyas formaciones son producidas por el hongo; al proyectarse desde la cara inferior, sirven para sujetar el talo al sustrato y pueden actuar reteniendo agua (Izco 2000).

Durante los últimos tiempos, numerosos estudios han utilizado líquenes epífitos para estimar los niveles de contaminación atmosférica creada principalmente por el dióxido de azufre. La naturaleza tóxica del dióxido de azufre es probablemente el principal factor que afecta a las especies de líquenes y a la corteza de los árboles, produciendo su acidificación (Herk 2001). Debido a que los organismos epífitos reciben la mayor parte de los nutrientes a partir de la atmósfera, son más susceptibles a los factores atmosféricos y, por lo tanto,

constituyen sustratos ideales para ser utilizados como bioindicadores (Hawksworth *et al.* 2005).

Muchos bioindicadores pueden responder a la contaminación por alteración de su fisiología o su capacidad para acumular elementos o sustancias. La respuesta de cada organismo está fuertemente influenciada por las condiciones físicas de la atmósfera (temperatura, humedad, vientos y radiación), así como por las condiciones fisiológicas y nutricionales (Marcelli y Seaward 1998). Muchas especies de líquenes como *Ramalina ecklonii* (Spreng.) y *Usnea densirostra* (Tayl.) muestran sensibilidad ante la contaminación; otras pocas como *Hyperphyscia variabilis* Scutari, *Hyperphyscia endochrysea* (Kremp.) Moberg y *Physcia undulada* Moberg se desarrollan mejor en áreas urbanas, mostrando resistencia a la contaminación (Estrabou 1998).

Los ambientes pueden ser caracterizados por la cobertura, abundancia y frecuencia de especies líquénicas de tres grupos ecológicos: especies neutrofíticas, nitrofíticas y acidofíticas. El predominio de uno de estos grupos ecológicos es indicador de las características del ambiente afectado. Así por ejemplo, un aumento de especies nitrofíticas se vincula con un aumento de óxidos de nitrógeno en áreas urbanas (Gombert *et al.* 2004). Los cambios en comunidades o poblaciones de líquenes son utilizados como indicadores sensibles del efecto biológico de los contaminantes; el mapeo de la diversidad de líquenes se ha vuelto una rutina en numerosos países, ya que proveen información del impacto biológico de la contaminación del aire. Estos estudios son además rápidos y poco costosos (Loppi *et al.* 2002a).

La mayoría de los casos de desaparición de líquenes se debe a contaminantes gaseosos como el dióxido de azufre, fluoruros, ozono, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y otros contaminantes gaseosos que emanan los automóviles por combustión (Hawksworth *et al.* 2005). Desde las últimas décadas, el dióxido de azufre es el principal contaminante que afecta la distribución de líquenes epífitos en áreas urbanas e industriales (Giordani 2007). Altos niveles de dióxidos de azufre, monóxido de carbono y, especialmente, de óxidos de nitrógeno y la reacción de sus productos, son los responsables del decaimiento de los líquenes (Loppi *et al.* 1997). En general, los contaminantes gaseosos penetran en la planta por el estoma, junto con el aire necesario, durante el proceso normal de respiración. Una vez en la hoja, los contaminantes destruyen la clorofila e interrumpen la fotosíntesis. Los daños pueden variar desde una reducción en la velocidad de crecimiento de la planta hasta su muerte por completo (Seinfeld 1978).

Los líquenes absorben el dióxido de azufre, del que retienen aproximadamente 30 %. Al haber repetidas exposiciones al dióxido de azufre, el líquen acumula altos niveles de sulfatos y bisulfatos, los cuales lo incapacitan para realizar funciones tales como fotosíntesis, respiración y en algunos casos fijación de nitrógeno. Esto ocasiona la deformación de la estructura del talo y eventualmente su muerte. Un nivel anual de 8-30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de sulfuro produce la deformación o la muerte de especies liquénicas sensibles. Los efectos fisiológicos sobre el líquen al exponerlo a óxidos de nitrógeno son similares a los de exposición a dióxidos de azufre, ya que un nivel anual de 564 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ o mayor de óxidos de nitrógeno puede resultar en la decoloración, deformación y en la muerte del líquen (Froehlich 2006).

Los contaminantes atmosféricos pueden ser retenidos por los líquenes, en partículas atrapadas en los espacios intercelulares. La retención eficiente de elementos contaminantes por parte del líquen dependerá del número y naturaleza del sitio de unión extracelular, edad del tejido y las condiciones de crecimiento del líquen. A pesar del daño que sufren la integridad de sus células y tejidos por la acumulación de sustancias particulares, los líquenes pueden indicar la presencia de compuestos químicos en la atmósfera urbana (Giordano *et al.* 2005).

Características de la ciudad y estudios ambientales urbanos anteriores

La ciudad de San Luis tiene una población calculada de 210,707 habitantes (INDEC 2008), siendo la más importante de la Provincia, desde el punto de vista económico y poblacional. El modelo de desarrollo implementado en la ciudad no ha favorecido la expansión del casco urbano y la mayoría de las actividades comerciales y gubernamentales se mantienen en un radio muy cerrado.

La ciudad tiene un importante polo industrial, situado a 4 km al oeste del centro geográfico de la misma y está rodeado de áreas urbanas, donde se producen diariamente episodios de contaminación ambiental (Bernasconi 1999).

Bernasconi (1999), utilizando el método de transplante de líquenes, determinó un índice de degradación de clorofila entre 2 a 4 veces mayor que sus congéneres del área control sin contaminación.

En los estudios realizados utilizando métodos químicos y electroquímicos (Lijteroff *et al.* 1999, Lijteroff 2000), se determinaron altos niveles en la concentración de monóxido de carbono y óxidos de azufre, principalmente en el área central de la ciudad. La radicación industrial trajo aparejado un creci-

miento poblacional explosivo en el espacio urbano, con un aumento del 43 % en un período intercensal (diez años). Los estudios anteriores infieren que los resultados son debidos principalmente a la falta de fluidez del tránsito en las calles y a la gran cantidad de vehículos que circulan por hora.

El micro centro de la ciudad se caracteriza por sus calles y aceras angostas y por un bajo porcentaje de áreas destinadas a espacios verdes. Estas características impiden una buena dispersión de gases y favorecen los procesos de contaminación ambiental. El elevado tránsito vehicular es la causa principal que ha producido una alteración de la calidad del aire, por la liberación de gases contaminantes de los motores de combustión interna.

El presente trabajo buscó conocer si el proceso de contaminación atmosférica del centro de la ciudad de San Luis, originado principalmente por la emisión de fuentes móviles, ha generado modificaciones significativas en las comunidades de líquenes urbanos, y si las mismas pueden evidenciar un proceso de degradación ambiental.

La hipótesis planteada para el presente trabajo es que el área céntrica de la ciudad de San Luis posee altos niveles de contaminación, que puede ser detectada por medio de líquenes como bioindicadores, a través del método del Índice de Pureza Atmosférica (IPA).

Los objetivos del presente trabajo son:

- Registrar los géneros de líquenes presentes en el espacio urbano.
- Estimar la diversidad, equitatividad y riqueza de la comunidad liquénica del centro de la ciudad de San Luis y de la ciudad de Juana Koslay.
- Determinar el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) en el área céntrica de la ciudad de San Luis y en un área control definida en la ciudad de Juana Koslay.
- Comprobar si el método del IPA puede determinar gradualidad en los niveles de contaminación, aplicado a la escala urbana de la ciudad de San Luis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los muestreos fueron realizados en la ciudad de San Luis, provincia de San Luis, y en la ciudad de Juana Koslay, localidad de El Chorrillo, ubicada a 6 kilómetros al este de la ciudad capital de San Luis, utilizada como sitio de comparación o testigo por ser un sector de menor desarrollo urbanístico y estar dentro del mismo ecosistema (**Fig. 1**).

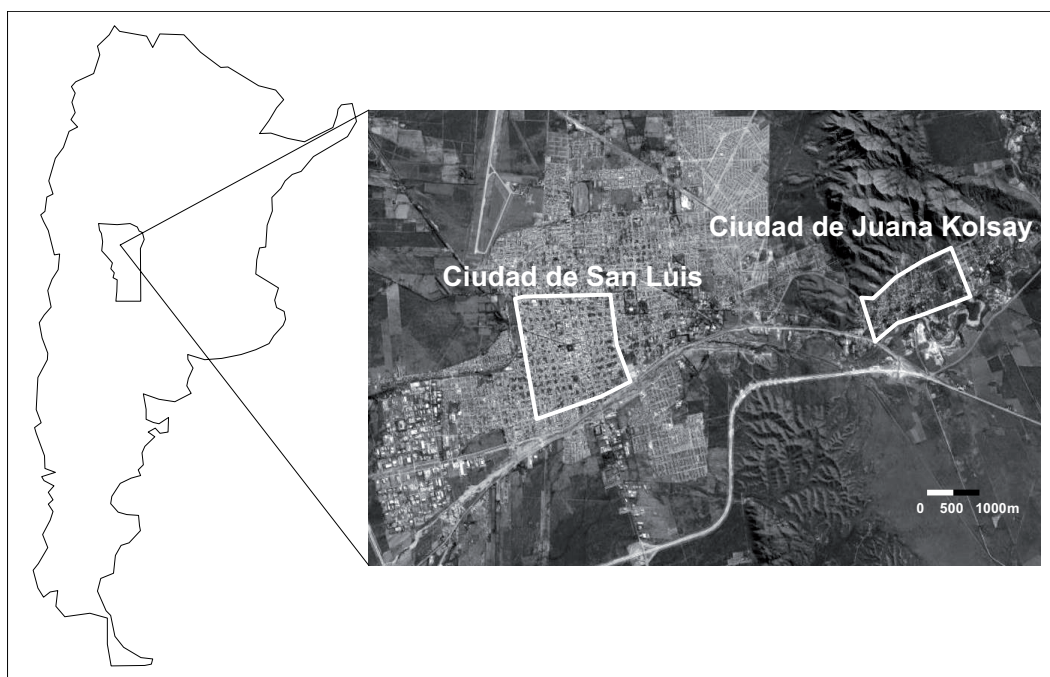


Fig. 1. Argentina, Provincia de San Luis, áreas de estudio: ciudad de San Luis, ciudad de Juana Koslay

Una de las variables que pueden influir en el desarrollo de los líquenes es el clima. En el **cuadro I** se presentan los valores de las variables climáticas relevantes en la zona de estudio. La región donde se encuentran estas áreas de estudio se caracteriza por presentar una temperatura media anual de 17.2 °C y precipitaciones medias de 628 mm anuales. La altura media es de 853 m sobre el nivel del mar (SMN 2006).

CUADRO I. DATOS ESTADÍSTICOS DEL CLIMA PERÍODO 1981-1990. (VALORES MEDIOS MENSUALES DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL 2006)

Mes	Temp. °C	H.R.A. %	Viento km/h	Precipitación mm
Enero	24.4	56	15.6	113.9
Febrero	23.4	57	15.7	102.1
Marzo	20.3	60	15	94.1
Abril	16.6	66	13	39.7
Mayo	12.9	63	12.9	18.5
Junio	9.6	62	12.6	7
Julio	9.2	62	13.5	20.9
Agosto	11.9	53	16.1	7.6
Septiembre	14	51	17.2	26.1
Octubre	18.9	49	19.7	32
Noviembre	21.6	49	20.8	79.3
Diciembre	23.9	52	18.4	86.6

Según Naumann y Madariaga (2003), estas dos áreas se encuentran en la región del Bosque o Parque Chaqueño. Este territorio posee un clima subtropical y presenta una formación de bosques templados mixtos donde el quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco* Schltdl.) y los algarrobos (*Prosopis* spp.) son los taxones arbóreos predominantes (Zuloaga y Morrone 1999). Su relieve presenta llanuras con ligeras depresiones o serranías de poca elevación de suelos rocosos pedregosos.

El estudio se realizó en el macro centro de la ciudad de San Luis, con centro en la plaza Juan Pascual Pringles (33°18'9"S-66°20'9"W). Se subdividió el área urbana seleccionada en cinco sectores, que comprenden aproximadamente 30 manzanas cada uno, denominándolos como centro (C), sureste (SE), noreste (NE), suroeste (SO) y noroeste (NO) respectivamente, siguiendo el criterio utilizado para realizar estudios de contaminación con otras técnicas de muestreo (Bernasconi 1999, Lijteroff 2000). Se cubrió una superficie aproximada de 188 ha. El sector Centro es el que agrupa la mayoría de las actividades comerciales y gubernamentales. Los otros cuatro sectores están destinados principalmente al uso habitacional.

Todos los muestreos se realizaron sobre el margen sur de las veredas, por ser el que recibe menor insolación a lo largo del día. Se realizaron transectas que variaron entre 500 y 600 m (según el sector) en dirección este-oeste, cubriendo la totalidad de

las manzanas incluidas en cada uno de los sectores analizados. La distancia entre los árboles muestreados dentro de una misma manzana es de 5 a 7 m y corresponde al arbolado público urbano. Las distancias entre las transectas de los distintos sectores muestreados superaron los 800 metros.

Los muestreos del área control fueron realizados en un espacio urbano en crecimiento (ciudad de Juana Koslay, 33°16'616"S-66°16'616"W), aplicando el mismo criterio utilizado en la ciudad de San Luis. La zona se caracteriza por la presencia de un bajo índice de ocupación y por constituirse en un espacio de transición entre la urbe y las áreas naturales que rodean la ciudad de San Luis. Esta ciudad presenta una densidad poblacional muy baja y es una zona caracterizada por baja circulación de autos; no hay actividad industrial o fuentes fijas de contaminación. Se evaluó un área comprendida en un polígono que corresponde a una superficie aproximada de 88 ha.

Se encuentra en la formación vegetal bosque de quebracho blanco y algarrobo, aunque notablemente modificada por la actividad humana, pudiendo registrarse sólo en algunas zonas la vegetación nativa.

El régimen de vientos predominantes de la región es de dirección SE y N, por lo que los contaminantes generados en el área urbana no serían trasladados al área usada como control.

Se realizó inicialmente un inventario con los forófitos presentes en el espacio urbano de la ciudad de San Luis y Juana Koslay. Se midió el pH de la corteza de cuatro forófitos de distintos taxones, para descartar al pH como variable que pudiera afectar el crecimiento liquénico. La medición del pH de la corteza en el laboratorio se realizó mediante el método propuesto por Kricke (2002). Todas las muestras se replicaron por triplicado.

Todos los muestreos se realizaron sobre los taxones *Melia azedarach f. umbraculifera* "Paraíso sombrilla" y *Morus* spp. "Mora". Ambos taxones tienen corteza con rugosidad y acidez similar.

Los muestreos de líquenes se realizaron entre los meses de octubre y diciembre que corresponde a la estación húmeda, beneficiosa para el desarrollo y multiplicación de los líquenes, facilitando su identificación. Se muestrearon todos los forófitos disponibles que cumplieron con las características morfológicas prefijadas. Se muestreó en árboles con un perímetro de tronco mayor o igual a 30 cm y que presentaran una corteza rugosa (Kricke y Loppi 2002). Se descartaron del estudio aquéllos que mostraran sus cortezas dañadas (por acción humana, de animales o bien por incendios) o con alteraciones fitosanitarias (Loppi *et al.* 2002b).

Para el estudio e identificación de líquenes, el material colectado en campo fue clasificado, posteriormente fueron congelados durante 48 horas, ensobrados con naftalina y catalogados. El material estudiado se encuentra en los herbarios BAFC, CERNAR (FCEFYN-UNC) y CTES (Argentina). Para la determinación de las especies se utilizaron claves dicotómicas, que incluyen datos que fueron obtenidos con técnicas de identificación de metabolitos secundarios, como reacciones puntuales de color e identificación de polisacáridos de paredes hifales por la técnica de Common (Estrabou 1998).

Para cada ejemplar se determinaron caracteres morfológicos como el color (a luz natural y a ojo desnudo) y tamaño del talo. Las características de ricinas, cilios, lóbulos, propágulos vegetativos y apotecios fueron analizados mediante el uso de una lupa estereoscópica (40x). Las mediciones de esporas y conidios se realizaron mediante el uso de un microscopio óptico (40x).

Para realizar los inventarios se utilizó una gradilla de alambre de 10 cm de ancho por 50 cm de alto, dividida en 20 cuadrados iguales de 5 cm de lado. La base de la gradilla se colocó a una altura de 120 cm del suelo. Para realizar el muestreo de líquenes, se seleccionó la cara del árbol con mayor cobertura, que en todos los casos correspondió a la del sur, que coincide con la de menor exposición solar durante el día. A cada una de las especies presentes en el área que abarcó la gradilla se le asignó un valor de frecuencia de 1 a 20, en función del número de cuadros de la gradilla en los que estuvo presente, de acuerdo a la metodología de Calatayud-Lorente y Sanz (2000), modificada para adecuarse al presente trabajo.

Los líquenes muestreados se encuentran entre los denominados macro líquenes, que se perciben a simple vista o con la ayuda de una lupa de campo (Kinnunen *et al.* 2003).

Se calculó el IPA para cada árbol, sumando las frecuencias de todas las especies presentes. Este valor indica indirectamente la cobertura liquénica en el área del muestreo y directamente la diversidad de especies. En el valor del IPA de cada sector urbano muestreado, se considera la media de todos los relevamientos tomados (Calatayud-Lorente y Sanz 2000).

Determinación del IPA:

IPA árbol = Sumatoria de la frecuencia de cada especie (número de cuadros de la gradilla ocupados). Valores de 0 a 20.

IPA área = Promedio de los valores de los IPA árbol de cada área.

Para el cálculo de Diversidad de Shannon (H), Equitatividad (J) y Riqueza (S), se aplicaron las siguientes fórmulas:

Índice de Diversidad de Shannon: $H = -\sum P_i \ln P_i$
Equitatividad: $J = -\sum P_i \ln P_i / \ln S$

Siendo:

S = riqueza (número de taxones)

$P_i = n_i/nT$

n_i : número de cuadros de la gradilla ocupados por un taxón

nT : número total de cuadros de la gradilla (20)

La riqueza se calculó como el número de taxones presentes.

Para el análisis estadístico se utilizó la prueba de Kolmogoroff-Smirnoff-Lilliefors para determinar la normalidad de los datos y para la comparación de los datos del espacio urbano y del área control.

La comparación entre los datos obtenidos del IPA en las distintas áreas de muestreo se realizó por medio de la prueba de Kruskal-Wallis (ANOVA para datos no paramétricos). Para la comparación de diversidad se consideró el estadístico ANOVA de una vía. En todos los casos se consideró un $\alpha = 0.05$.

Para el análisis estadístico se utilizaron el programa Excel (versión 2003) del paquete Microsoft Office y el programa Graph Pad InStat (versión 4).

RESULTADOS

El número total de forófitos analizados durante el estudio fue de 254 ejemplares.

Valores de pH

En el **cuadro II** se presentan los valores de pH de los forófitos analizados antes de comenzar los muestreos. Cada valor de pH corresponde a una muestra

CUADRO II. VALORES DE pH DE LA CORTEZA DE ÁRBOLES A ANALIZAR

	Paraíso	Olmo	Mora	Algarrobo
Valores de pH	6.33	8.1	7.24	6.45
	5.36	9.23	6.1	6.35
	5.33	7.24	6.17	5.74
\bar{X}	5.7	8.2	6.5	6.18
S	0.6	1.0	0.6	0.38

\bar{X} : promedio, S: desviación estándar

individual tomada en un árbol, obtenida del sector tomado como referencia (ciudad de Juana Koslay), donde los valores de contaminación son menores.

De la comparación entre los valores de pH para los cuatro forófitos analizados mediante ANOVA, se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas entre ellos ($P = 0.009$). Por lo tanto se utilizaron el árbol del paraíso y el de la mora como forófitos a ser evaluados, ya que los valores medios de pH no difirieron entre sí en estos taxones ($P = 0.1681$), y se encontraron mejor representados en el ambiente. Los valores de pH de *Prosopis* spp. "algarrobo" no difirieron estadísticamente de los hallados en paraíso y mora ($P = 0.2455$).

En el **cuadro III** se muestra la cantidad de árboles muestreados durante el trabajo y el valor en porcentaje de árboles con presencia de líquenes en cada área muestreada.

Los taxones liquénicos hallados son 9 en total, de los cuales 5 se identificaron a nivel de especie, mientras que los restantes se identificaron a nivel de género.

Las especies halladas en cada área se detallan en el **cuadro IV**.

Análisis estadístico de los Índices de Pureza Atmosférica

En el **cuadro V** se presentan los valores promedios del IPA árbol para las distintas áreas analizadas. Este valor representa la sumatoria de las frecuencias de las especies de líquenes hallados sobre cada forófito muestreado y el valor se asocia a la calidad del aire en el punto muestreado.

CUADRO III. NÚMERO DE ÁRBOLES ANALIZADOS EN CADA ÁREA. PORCENTAJE DE ÁRBOLES CON LÍQUENES

	Área de estudio (Ciudad de San Luis)					Control
	Centro	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste	
Árboles muestreados	28	51	42	42	38	53
Árboles con líquenes	1	5	7	5	2	31
% árboles con líquenes	3.57	9.8	16.6	11.9	5.26	58

CUADRO IV. LISTADO DE TAXONES ENCONTRADOS EN EL ÁREA DE ESTUDIO (CIUDAD DE SAN LUIS) Y EL ÁREA CONTROL (CIUDAD DE JUANA KOSLAY)

Especie	Área de estudio	Área control
<i>Candelaria concolor</i> (Dicks.) Steiner	*	*
<i>Hyperphyscia</i> sp.	*	*
<i>Physcia</i> sp.	*	-
<i>Physcia tribacea</i> (Ach.) Nyl.	-	*
<i>Physcia undulata</i> Moberg	-	*
<i>Punctelia</i> spp.	*	*
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i> (L.) Beltr	*	*
<i>Teloschistes</i> spp.	-	*
<i>Xanthoria candelaria</i> (L.) Th. Fr.	*	*

*Presencia en el punto de muestreo, - Ausencia en el punto de muestreo

Del análisis mediante la prueba de Kolmogoroff-Smirnoff-Lilliefors para normalidad (contraste KSL), para los valores hallados en los seis sectores analizados, se determinó que la distribución no es normal ($p < 0.0001$).

En vista a lo anterior, se analizaron los datos mediante la prueba de Kruskal-Wallis (ANOVA para datos no paramétricos). Del análisis de los resultados se desprende que no existen diferencias estadísticamente significativas ($P > 0.05$) entre los cinco sectores muestreados.

En la comparación entre el IPA de las distintas áreas de la ciudad de San Luis y el área de la ciudad de Juana Koslay, se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas ($P < 0.001$).

En el **cuadro VI** se presentan los valores de frecuencia obtenidos de cada uno de los taxones y su contribución a la conformación del valor del IPA de la zona analizada. El valor del IPA de cada área, dado por la sumatoria de valores (IPA árbol), coincide con el de la sumatoria de las frecuencias relativas que aporta cada uno de los taxones evaluados.

Determinación de Riqueza (S), Diversidad (H) y Equitatividad (J)

En el **cuadro VII** se presentan los valores de los índices obtenidos para cada uno de los sectores analizados.

CUADRO V. VALORES DEL I.P.A. ÁRBOL PROMEDIOS PARA CADA ÁREA ANALIZADA

	Área de estudio					Control
	Centro	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste	
I.P.A.	0.65	1.33	4.25	2.4	0.39	27.55
N	28	51	42	42	38	53
S	3.4	6.3	10.6	7.3	2.1	28.9

N: número de árboles muestreados, S: desviación Standart

CUADRO VI. FRECUENCIA DE LOS TAXONES PRESENTES EN LAS ÁREAS. VALORES DEL I.P.A. DE CADA ÁREA

Taxones	Frecuencias					Control
	Área de estudio					
	Centro	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste	
<i>Candelaria concolor</i>	-	0.04	1.07	0.69	-	4.13
<i>Hyperphyscia</i> sp.	0.36	0.47	2.11	1.38	0.21	6.53
<i>Physcia</i> sp.	0.29	0.78	1.02	0.26	0.18	-
<i>Physcia tribacea</i>	-	-	-	-	-	8.66
<i>Physcia undulada</i>	-	-	-	-	-	1.21
<i>Punctelia</i> spp.	-	-	-	0.10	-	2.64
<i>Teloschistes chrysophthalmus</i>	-	0.04	-	-	-	0.21
<i>Teloschistes</i> spp.	-	-	-	-	-	3.26
<i>Xanthoria candelaria</i>	-	-	0.05	0.07	-	0.91
I.P.A. área	0.65	1.33	4.25	2.4	0.39	27.55

CUADRO VII. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE RIQUEZA (S), DIVERSIDAD (H) Y EQUITATIVIDAD (J) EN CADA UNA DE LAS ÁREAS

	Área de estudio					Control
	Centro	Noroeste	Noreste	Suroeste	Sureste	
S	2	4	4	4	2	8
H	0.68	0.89	1.08	1.02	1.15	1.74
J	0.98	0.64	0.78	0.73	0.51	0.83

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se han comparado varios índices de diversidad usados para el estudio de los líquenes como indicadores de la calidad del aire, concluyendo que la sumatoria de las frecuencias de aparición de las especies en una superficie determinada era el que mejor se correlacionaba con las concentraciones de SO₂ y otros contaminantes del aire (Calatayud-Lorente y Sanz 2000, Kricke y Loppi 2002). Este método ha sido aplicado en trabajos realizados en zonas cercanas al área de estudio, pero con características urbanas diferentes, con menor densidad poblacional y menor tránsito vehicular (Santoni 2004, Santoni y Lijteroff 2006).

Calatayud-Lorente y Sanz (2000) aclaran que para utilizar este tipo de escalas basadas en el cálculo del IPA, es necesario que se adapten para cada territorio, ya que la sensibilidad de las distintas especies puede ser diferente. Según estos autores, esta sensibilidad viene relacionada también con factores climáticos (los líquenes en estado seco son menos sensibles al SO₂) o corológicos (una especie en el extremo de su área de distribución puede ser más sensible que en una zona donde esté en su óptimo). Kinnunen *et al.* (2003) también sugieren ciertas modificaciones donde se analicen unas pocas especies fácilmente identificables, además de una buena preparación y de la unificación de criterios para la determinación de especies a campo.

Es conocido que otras variables ecológicas como el sustrato, la luz y el polvo, inducen modificaciones en las frecuencias de las especies liquénicas (Froehlich 2006). Teniendo en cuenta esto, en el muestreo se mantuvo el sustrato constante *Melia azedarach f. umbraculifera* y *Morus* spp. Los muestreos se realizaron durante el verano temprano, ya que es un periodo de estación húmeda en la región y también temperaturas favorables para el crecimiento y desarrollo liquénico. Para evitar alteraciones por radiación solar o viento, se muestreó siempre la cara sur del tronco (menor insolación) con la mayor presencia liquénica. De este

modo, se buscó disminuir la variación en los resultados que pudieran estar influidos por efecto del ambiente, por tratarse de un trabajo de campo.

Los dos sectores muestreados se encuentran a escasa distancia, por lo que los efectos meteorológicos (temperatura, humedad, precipitaciones) afectan prácticamente por igual a ambas zonas. Podrían existir, en algunos sectores, efectos micrometeorológicos que no fueron tenidos en cuenta, debido a la extensión de los muestreos realizados en ambos espacios urbanos.

Las especies de líquenes halladas, tanto en el área de estudio como en el área control, prácticamente fueron las mismas. Las similitudes entre la comunidad de líquenes de la ciudad de San Luis y la de Juana Koslay hace pensar que la segunda es la de origen. Por otro lado, en Juana Koslay existen otras especies ya descritas para la zona, que no fueron encontradas en los muestreos del presente trabajo (Santoni 2006), lo que muestra la mayor riqueza de la zona. Los líquenes encontrados en las dos áreas de estudio poseen una buena afinidad al tipo de corteza de los forófitos seleccionados. El pH de la corteza es importante no sólo por su efecto sobre la presencia-ausencia de líquenes, sino también por la distribución de los mismos. Generalmente, árboles con valores de pH similares desarrollan en sus cortezas especies liquénicas similares, siendo la acidez un condicionante para el crecimiento (Hobohm 1998).

La primera diferencia que se evidencia en la comparación entre las dos áreas de estudio es el porcentaje de árboles con líquenes en los distintos parches muestreados. En la ciudad de San Luis es evidente una tendencia hacia el llamado “desierto de líquenes”. En el sector Centro de esta ciudad, de 28 forófitos analizados, sólo uno evidenció la presencia de líquenes (3.57 %), lo que puede considerarse como extremadamente bajo. El promedio de árboles con líquenes entre todas las áreas muestreadas en la ciudad de San Luis fue de 9.4 %, frente a 58 % del área control.

Los valores del IPA árbol en los sectores analizados en la ciudad de San Luis fueron mucho más bajos que los del área control. El promedio de todos los sectores muestreados en la ciudad fue de 1.8, frente al de la ciudad de Juana Koslay, con un valor de 27.5. El valor más bajo de I.P.A. se evidenció en el sector Sureste. Este sector, junto con el Centro, es además el de menor riqueza de especies. Los valores bajos de riqueza e IPA en el sector Centro podrían asociarse a la contaminación, originada principalmente en fuentes móviles. Los valores bajos del

sector Sureste podrían asociarse a su proximidad a los parques industriales y a la presencia de fuentes fijas de contaminación.

Cuando se analizan los valores de diversidad, riqueza y equitatividad, los hallados en la ciudad de San Luis son muy inferiores a los del área control, excepto en el área de estudio Centro (San Luis), donde la equitatividad es mayor. Los valores de riqueza del área control son claramente más elevados que los de las restantes áreas. Lo mismo sucede con la diversidad, indicando que el área control tendría un mayor número de especies y una mayor variedad interna entre sus especies liquénicas. El área control tiene una equitatividad elevada en comparación con las otras áreas; las especies se encontrarían más uniformemente distribuidas y mejor representadas que las encontradas en los distintos sectores de la ciudad de San Luis.

Del análisis de distribución de los líquenes en el ambiente y los valores del IPA hallados, se podría inferir que los taxones toxitolerantes son *Candelaria concolor*, *Hyperphysia* sp. y *Physcia* sp., que estuvieron bien representadas tanto en la ciudad de San Luis como en el área control. Los taxones *Physcia tribacea*, *Physcia undulata* y *Teloschistes* spp., podrían ser considerados como toxifóbicos o más sensibles a la contaminación urbana. Estos resultados coinciden con los encontrados por Estrabou *et al.* (2005), quienes en un estudio comparativo entre cuatro ambientes identificaron a *P. undulata* entre las especies toxifóbicas, con una ausencia total en el microcentro de la ciudad de Córdoba (Argentina), pero presente en la periferia urbana y áreas naturales menos contaminadas. En el caso de *Candelaria concolor*, el presente estudio arroja los mismos valores al de Estrabou, donde la presencia de esta especie está distribuida uniformemente en todos los ambientes (urbanos y naturales).

Los resultados obtenidos en el análisis estadístico de los datos del IPA muestran que las diferencias entre los índices de cada área (área de estudio y área control) son estadísticamente significativas. A partir de los estudios realizados, la información que se obtiene por medio del IPA resulta concordante con lo observado en campo, ya que a simple vista se puede distinguir una clara disminución de líquenes epífitos de las áreas urbanas de la ciudad de San Luis en relación con los del área control.

La circulación de vehículos a motor, la presencia de calles angostas, la falta de áreas verdes urbanas y la conformación de espacios con poca renovación del aire, generarían las condiciones apropiadas para que los niveles de contaminación sean elevados. Los

resultados encontrados en el presente estudio coinciden con los postulados en la hipótesis del trabajo. La ausencia casi total de líquenes, evidenciada en los muestreos en la ciudad de San Luis, puede relacionarse con la baja calidad del aire que se percibe en el espacio urbano.

Las presiones ambientales (contaminación, desecación, etc.) presentes en el espacio urbano, influyen sobre las variables ecológicas estudiadas de la comunidad liquénica, permitiendo que permanezcan sólo aquellas especies que logran adaptarse.

Si bien algunos autores cuestionan la efectividad de esta metodología para evaluar la calidad del aire, los resultados arrojados en el presente estudio estarían apoyando la validez de la misma, al menos para realizar comparaciones a escala local.

REFERENCIAS

- Alexopoulos C. y Mims C. (1985). *Introducción a la micología*. Omega, Barcelona, 660 pp.
- Ariño-Vila X., Azuaya T., García A. y Gómez-Bolea A. (1997). Els líquens com a bioindicadors de la qualitat atmosfèrica: el cas de la vall de Fumanya. Bol. Inst. Cat. Hist. Nat. 65, 5-13.
- Bernasconi E. (1999). Estudio estacional comparativo del Índice de Contaminación (I.C.) en la ciudad de San Luis utilizando al líquen (*Tayl.*) como bioindicador. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de San Luis, San Luis.
- Calatayud-Lorente V. y Sanz Sánchez M. (2000). *Guía de Líquenes Epífitos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Madrid, 185 pp.
- Estrabou C. (1998). Lichen species identification and distribution according tolerance to airborne contamination in the city of Córdoba, Argentina. En: *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications* (M. Marcelli y M. Seaward, Eds.) CETESB, Sao Paulo, 165-169.
- Estrabou C., Sienfkens L., Hadid M., Rodríguez J. y Pérez A. (2005). Estudio comparativo de la comunidad liquénica en cuatro ecosistemas de la Provincia de Córdoba. Bol. Soc. Arg. Bot. 40, 3-12.
- Froehlich A. (2006). A look at Willamette valley air quality using lichen communities as bioindicators. Research Based Learning 49, 377-389.
- García L. y Rubiano O. (1984). Comunidades de líquenes como indicadores de niveles de calidad del aire en Colombia. Cont. Amb. 8, 73-90.
- Giordani P. (2007). Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. Env. Poll. 146, 291-576.

- Giordano S., Adamo P., Sorbo S. y Vingiani S. (2005). Atmospheric trace metal pollution in the Naples urban area based on results from moss and lichen bags. *Env. Poll.* 136, 431-442.
- Gombert S., Asta J. y Seawaed M. (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). *Sc. Tot. Env.* 324, 183-199.
- Hawksworth D., Iturriaga T. y Crespo A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Rev. Iberoam. Mic.* 22, 71-82.
- Herk C. (2001). Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time. *Lichenol.* 33, 419-441.
- Hobohm C. (1998). Epiphytische Kryptogamen und pH-Wert - ein Beitrag zur ökologischen Charakterisierung von Borkeoberflächen. *Herzogia* 13, 107-111.
- INDEC (2008). Instituto Nacional de Estadística y Censos, Argentina. www.indec.gov.ar/nuevaweb/cuadros/2/estimaciones-serie34.pdf Consultado: marzo 2009.
- Izco J. (2000). *Botánica*. McGraw-Hill Interamericana, Madrid. 906 pp.
- Kinnunen H., Holopainen T. y Kärenlampi L. (2003). Sources of error in epiphytic lichen variables mapped as bioindicators: needs to modify the Finnish standard. *Ecol. Indic.* 3, 1-11.
- Kricke R. (2002). Measuring bark pH. En: *Monitoring with lichens-monitoring lichens* (P.L. Nimis, C. Scheidegger y P.A. Wolseley, Eds.). NATO Science Series, Vol. 7, pp. 333-336.
- Kricke R. y Loppi S. (2002). Bioindication: the I.A.P. approach. En: *Monitoring with lichens-monitoring lichens* (P.L. Nimis, C. Scheidegger y P.A. Wolseley, Eds.). NATO Science Series, Vol. 7, pp. 21-37.
- Lijteroff R., Cortínez V. y Raba J. (1999). Urban development and air quality in San Luis City, Argentina. *Environ. Monit. Assess.* 57, 169-182.
- Lijteroff R. (2000). Diagnóstico y gestión ambiental urbana en la ciudad de San Luis. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de San Luis, Argentina.
- Loppi S., Giovanelli L., Pirintso S., Putorti E y Corsini A. (1997). Lichens as bioindicators of recent changes in air quality (Montecatini Terme, Italy). *Ecol. Medit.* 23, 53-56.
- Loppi S., Giordani P., Brunialti G., Isocrono D. y Piervittori R. (2002a). Identifying deviations from neutrality of lichen diversity for bioindication purposes. En: *Monitoring with lichens – monitoring lichens* (P.L. Nimis, C. Scheidegger y P.A. Wolseley, Eds.). NATO Science Series, Vol. 7, pp. 281-284.
- Loppi S., Ivanov D. y Boccardi R. (2002b). Biodiversity of epiphytic lichens and air pollution in the town of Siena (central Italy). *Env. Poll.* 116, 123-128.
- Marcelli M., y Seaward M. (1998). *Lichenologists in Latin America: history, current knowledge and applications*. CETESB, Sao Paulo, 177 pp.
- Naumann M. y Madariaga M. (2003). Atlas Argentino. Programa de acción contra la desertificación. Agencia Alemana de Cooperación Técnica, Buenos Aires, 94 pp.
- Santoni C. (2004). Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de bioindicadores, en la localidad de Juana Koslay, San Luis, Argentina. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional de San Luis, Argentina.
- Santoni C. y Lijteroff R. (2006). Evaluación de la calidad del aire mediante el uso de bioindicadores en la provincia de San Luis, Argentina. *Rev. Int. Cont. Amb.* 22, 49-58.
- Seinfeld J. (1978). *Contaminación Atmosférica. Fundamentos Físicos y Químicos*. Instituto de Estudios de Administración Local, Madrid, 558 pp.
- SMN (2006). Servicio Meteorológico Nacional, Fuerza Aérea Argentina. <http://www.smn.gov.ar/bdatos/valores.php?var=UIS> Consultado: marzo 2009.
- Zuloaga F. y Morrone O. (1999). *Catálogo de las plantas vasculares en la República Argentina*. Monographs in Systematic Botany 74. Missouri Botanical Garden Press, Saint Louis, EUA. 1269 pp.