

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA  
VICERRECTORÍA ACADÉMICA  
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES  
Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales

**LÍQUENES COMO BIOINDICADORES DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA  
EN LA ZONA URBANA DE SAN JOSÉ**

Tesis sometida a la consideración del Tribunal Examinador  
del Programa de Maestría en Manejo de Recursos Naturales de la  
Escuela de Ciencias Exactas y Naturales para optar al grado académico de:

Magister Scientiae en Manejo de Recursos Naturales  
con Mención en Gestión de la Biodiversidad

erichneurohr@gmail.com

Erich Neurohr Bustamante

San José, Costa Rica

2010

## **Dedicatoria**

A Carolina, Sofía, Felipe y Daniela.

Por ser mi aire y mi vida,

mi destino, mi aliento...

A Mutti,

quien rebotando sus ansias de saber,

me mostró el camino de la perseverancia.

Espléndido legado a seguir,

maravillosa aventura por descubrir...

## **Agradecimiento**

A Dios por su guía.

De manera muy especial a mi tutor, don Julián Monge, por sembrar en mi la semilla de la investigación, por su guía acertada y su apoyo incondicional. A mi estimada directora y profesora doña Zaidett Barrientos por su agudo sentido de dirección y su muy valioso aporte académico y profesional. A mis estimados profesores María Isabel González y Víctor Hugo Méndez, por sus valiosos aportes y guía. A la Sección de Parques de la Municipalidad de San José, especialmente a Jonathan Arias por su muy valiosa colaboración y aporte en el uso de la herramienta del sistema de información geográfico y la generación de los mapas, así como a Gabriela Sánchez por su apoyo incondicional. A mis profesores y compañeros de maestría por su constante apoyo y acertadas correcciones a este proyecto. A mi amada esposa Carolina y adorados Sofía, Felipe y Daniela, por su apoyo y comprensión ante la ausencia de su esposo y padre durante tantas noches y días de estudio. A mi querida Mutti por su espíritu y colaboración como asistente en la toma de las muestras de cobertura e identificación de los árboles. A Juan Navarro por su ayuda en la localización e identificación de los parques. A Danilo Hernández por su impulso al inicio de esta aventura.

# Líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica en la zona urbana de San José

**Erich Neurohr: Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, Universidad Estatal a Distancia, Costa Rica, [erichneurohr@gmail.com](mailto:erichneurohr@gmail.com)**

**Resumen:** En el Valle Intermontano Central de Costa Rica, el sistema atmosférico que rige el clima es la Zona de Convergencia Intertropical, con predominio de los vientos alisios con dirección noreste - suroeste. En la zona urbana de San José (ZUSJ), cuyo centro se ubica en las coordenadas 527 850 este y 212 670 norte según el sistema de coordenadas métricas Lambert Costa Rica Norte, hay escasez de información científica en cuanto a la distribución de la contaminación atmosférica. El propósito de esta investigación fue evaluar el patrón espacial de la cobertura de líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica de la ZUSJ. Para delimitar el tema se restringió la investigación a un período de un año. Se definió una parcela con dirección noreste - suroeste para representar la dirección de los vientos dominantes de esta área. De una población aproximada de 200 parques se seleccionó aleatoriamente una muestra de 40 parques y se generó un mapa con isolíneas de contaminación. Para contemplar los efectos de la humedad en los líquenes, se realizaron dos muestreos replicados, uno al final de la época lluviosa y otro al final de la época seca. El porcentaje de cobertura fue mayor en la época lluviosa. En ambas épocas, fue clara la predominancia de parques poco contaminados al noreste y muy contaminados al suroeste de la ZUSJ. La distribución de la contaminación atmosférica, registrada en mapas con isolíneas de cobertura, fue similar para ambas épocas, aumentando las áreas de alta contaminación en la época seca. El aporte de esta investigación fue determinar que hay un patrón de contaminación y que el mismo es congruente con el recorrido de los vientos dominantes del noreste al suroeste en la ZUSJ.

**Palabras Clave:** cobertura de líquenes, bioindicadores, contaminación del aire, zona urbana de Costa Rica, mapa.

**Abstract:** The atmospheric system that governs the Central Valley of Costa Rica is known as "Zona de Convergencia Intertropical", with northeast – southwest predominant winds. In the urban area of San José (ZUSJ), located at coordinates 527 850 east and 212 670 north in the Lambert Costa Rica Norte system, there is lack of scientific information with respect to the atmospheric pollution. The purpose of this one year investigation was to evaluate the spatial distribution of the lichens cover as bioindicators of the atmospheric pollution at the ZUSJ. In order to represent predominant wind directions, a northeast – southwest parcel was defined. Of an approximate population of 200 parks, 40 parks were randomly selected and a map with the distribution of the pollution was generated. Two samples were replicated in order to incorporate the effect of the humidity on the lichens, one at the end of the rainy season and one at the end of the dry season. The percentage of cover was bigger for the rainy season. For both seasons, it was clear the predominance of less contaminated parks at the northeast and more contaminated parks at the southeast. Registered on maps with cover lines, the distribution of the atmospheric pollution was similar for both seasons, with an increase of the high contaminated zones for the dry season. The contribution of this investigation was to determine the pattern of pollution at the ZUSJ and to confirm its consistency with the predominant winds from northeast to southwest.

**Keywords:** lichen cover, bioindicators, air pollution, urban zone of Costa Rica, map.

## 1. Marco Teórico

En el mundo se han identificado aproximadamente veinte mil especies de líquenes. Estos son el resultado de una asociación simbiótica entre un hongo (micobionte) y un alga (fotobionte) y poseen características ecológicas únicas (Umaña y Sipman 2002). Los líquenes se caracterizan principalmente por la forma de su talo, el cual posee cuatro capas denominadas corteza superior, capa formada por algas, médula y corteza inferior. Estos se dividen en tres grupos de acuerdo con su aspecto externo (Fuga *et al.* 2008, Policnik *et al.* 2008, Umaña y Sipman 2002):

- Líquenes foliosos, que se asemejan a hojas.
- Líquenes crustáceos, los cuales tienen forma de costra.
- Líquenes fruticulosos, cuyos talos adquieren diferentes formas.

La clasificación taxonómica de los líquenes se basa principalmente en la estructura de sus órganos de reproducción sexual, y las principales familias y géneros se reconocen a partir de la forma del cuerpo fructífero (talo, lóbulos) y de las esporas, las cuales no se alcanzan a ver a simple vista (Umaña y Sipman 2002). Por ende, se requiere de especialistas para identificarlos correctamente.

Históricamente los líquenes han servido como bioindicadores debido a que son organismos sensibles que se degradan a consecuencia de la contaminación atmosférica global, reduciendo su porcentaje de cobertura en los troncos de árboles. En general, estos bioindicadores son organismos que pueden ser usados para la identificación y determinación cualitativa de la contaminación ambiental generada por los humanos (Conti y Cecchetti 2001). Barkman (1958) y Papert (1990), citados por Monge-Nájera *et al.* (2002a), son algunos de los investigadores que han recopilado información histórica sobre el uso de los líquenes como bioindicadores de contaminación del aire, cuya aplicación se remonta a mediados del siglo XIX. En muchos países como en Israel, se ha investigado la integridad fisiológica de las especies de líquenes expuestos a la contaminación por combustibles y otras actividades (Garty *et al.* 2000). En Europa, la liquenología se ha desarrollado mucho recientemente y se realizan seminarios específicos con estudios aplicados sobre este tema (Jovan 2007) y su relación con la contaminación del aire (Cristofolini *et al.* 2008, Policnik *et al.* 2008). En Latinoamérica, estos estudios empezaron hace aproximadamente medio siglo; primero en Venezuela por Vareschi (1953) y luego en Colombia por Ibagos (1977), García y Rubiano (1984) y Rubiano (1988), citados por Monge-Nájera *et al.*

(2002a); actualmente continúan los estudios en este campo (Lijteroff *et al.* 2009, Fuga *et al.* 2008).

Los líquenes se encuentran prácticamente en todos los ecosistemas del planeta y muchos se distribuyen según el tipo de clima y de bosque (Lijteroff *et al.* 2009).

De acuerdo con Umaña y Sipman (2002), los factores principales que determinan su distribución son:

- El agua. Los líquenes no tienen órganos especiales para absorber o conservar el agua del sustrato en que viven. Dependen de la lluvia y el rocío para obtener agua. Crecen más en lugares con humedad frecuente.
- La temperatura. Para su óptimo crecimiento, los líquenes requieren temperaturas que varían entre 15 y 25 °C. Los líquenes también son muy resistentes en estado seco, cuando se detiene su proceso de crecimiento.
- La luz. La mayoría de los líquenes prefiere un hábitat con mucha luz.
- El sustrato. Los líquenes pueden vivir y crecer en una gran variedad de superficies o sustratos, como rocas, madera, tierra, hojas y corteza. Muchas especies de líquenes pueden crecer únicamente sobre superficies específicas. Los que habitan bosques húmedos generalmente viven sobre corteza (cortícolas). Un ejemplo de éstos es la especie *Lobaria pallida* (Figura 10 – Anexo 1), la cual en el mundo se distribuye en las montañas neotropicales desde México hasta Bolivia; en Costa Rica, tiene amplia distribución en las montañas altas de Cartago (Volcán Irazú) y San José (Cerro de la Muerte y Parque Nacional Chirripó). Los que habitan en zonas frías o desiertos generalmente están sobre el suelo (terrícolas) o rocas (saxícolas) y los que crecen sobre hojas (folícolas) sólo se encuentran en climas similares a los de los bosques tropicales húmedos y en bosques templados con alta precipitación.
- La contaminación ambiental. Los líquenes se ven afectados por la contaminación atmosférica, la cual interfiere con su distribución, degradándolos y reduciendo su cobertura en el sustrato.

En términos generales, se estima que los líquenes son el mejor indicador para estudiar la contaminación global del aire, ya que al degradarse reflejan de forma integral los niveles de contaminación (Lijteroff *et al.* 2009, Cristofolini *et al.* 2008, Fuga *et al.* 2008, Policnik *et al.* 2008, Rojas-Fernández *et al.* 2008). Además, los métodos físico-químicos son menos prácticos, más costosos y se limitan a medir contaminantes de metales pesados como plomo, azufre, aluminio,

hierro o cobre (Lijteroff *et al.* 2009, Cristofolini *et al.* 2008, Fuga *et al.* 2008, Policnik *et al.* 2008). Sin embargo, existe la opinión de que los micro-hábitat formados por comunidades microbianas que se adhieren a las superficies minerales sólidas, también pueden servir como bioindicadores de cambios atmosféricos, teniendo el potencial de soportar niveles más altos de contaminación que los líquenes (Gorbushina 2007). Adicionalmente se han realizado estudios que indican que plantas tropicales como las bromelias (Brighigna 2002), musgos (Bedregal *et al.* 2005, Monnet *et al.* 2005) y tabaco (Nali *et al.* 2007, Gombert *et al.* 2006) también pueden ser utilizadas como bioindicadores útiles y económicos para evaluar la contaminación de la atmósfera.

Las investigaciones científicas en el área de la ecología urbana son relativamente nuevas, pues los ecólogos urbanos han conducido mayoritariamente estudios de observación en vez de investigaciones formales que relacionan causa/efecto. De ahí el llamado para el consecuente cambio de enfoque de los trabajos de investigación en torno a la ecología urbana, particularmente relacionados con la respuesta evolutiva de las especies a consecuencia del incremento urbanístico (Shochat *et al.* 2006).

### **1.1 Líquenes como bioindicadores**

Mundialmente el avance de la liquenología ha sido muy extenso en los últimos años. Conti y Cecchetti (2001) presentaron un resumen sobre el estado del conocimiento de los líquenes como indicadores biológicos para estimar la contaminación del aire, e indican que en pocos años se han publicado alrededor de 2000 artículos sobre el análisis de los líquenes. Se cita como estrés ambiental a todos los componentes químicos que se vierten a la atmósfera por el resultado de la actividad humana y que causan daño a los organismos vivientes. Son muchos los parámetros morfológicos, metabólicos y fisiológicos de los líquenes que pueden ser usados para evaluar el daño ambiental en los líquenes, como el contenido y degradación de la clorofila, cambios en los procesos fotosintéticos, la producción de etileno, las variaciones en los niveles de respiración, la conductividad eléctrica y los parámetros antioxidantes, entre otros (Conti *et al.* 2004, Conti y Cecchetti 2001,).

A manera de ejemplo, para determinar el impacto ambiental de la industria de combustión de fósiles en la bahía Haifa en Israel, se estudiaron las alteraciones fisiológicas en transplantes de líquenes de la especie *Ramalina lacera*, expuestos a altos grados de contaminación. Se encontró que la integridad fisiológica del liquen está determinada por la conductividad eléctrica, que se reduce al degradarse las membranas celulares del talo del liquen, por contaminación atmosférica (Garty *et al.* 2000). Se ha demostrado también que los parámetros antioxidantes de

los líquenes pueden servir como una forma mejorada para utilizarlos como indicadores de respuesta rápida por estrés a la contaminación (Weissman 2006). También se han empleado métodos para determinar la acumulación de diversos metales pesados en líquenes, tales como el *Evernia prunastri* en Italia (Conti *et al.* 2004).

Otra tendencia mundial en cuanto a las investigaciones liquenológicas es la identificación, el modelaje y el registro en mapas de los cambios de la vegetación de líquenes en áreas urbanas y rurales. Se han realizado estudios y modelos sobre la recolonización y el reestablecimiento de líquenes en el valle del Ruhr en Alemania (Kricke y Beige 2004). Mediante patrones espaciales de abundancia y frecuencia de especies se registró la contaminación del aire mediante los líquenes como controladores biológicos en Renania del Norte-Westfalia, Alemania (Stapper 2004). También se registraron en mapas los efectos de la contaminación del aire mediante la diversidad de líquenes como bioindicadores en el centro de Italia (Loppi 2004).

En Costa Rica hay pocos estudios sobre la cobertura de líquenes y su relación con la contaminación del aire. Los análisis iniciales sobre líquenes evaluaron la contaminación atmosférica en San José (Méndez 1977, Méndez y Fournier 1980). Luego, mediante trasplantes de líquenes de zonas templadas a un hábitat tropical, se estudió y confirmó que la contaminación atmosférica en Costa Rica también afecta a otras especies foráneas de líquenes (Grüninger y Monge-Nájera 1988). Finalmente, se publicaron investigaciones que abarcaron un período de veinte años y hacen referencia al cambio en la masa de líquenes en San José y su relación con la contaminación del aire, representada mediante su cobertura en troncos de árboles, así como un nuevo método para determinar dicha contaminación, utilizándolos como bioindicadores (Monge-Nájera *et al.* 2002a y 2002b).

## **1.2 Métodos para medir la contaminación atmosférica mediante líquenes**

Mundialmente se han hecho esfuerzos para establecer diversos métodos para medir y correlacionar la contaminación del aire con los líquenes (Cristofolini *et al.* 2008, Policnik *et al.* 2008, Giordani 2007, Nali *et al.* 2007). Los líquenes pueden ser utilizados como bioindicadores de contaminación atmosférica en dos formas diferentes (Conti y Cecchetti 2001):

### **1.2.1 Registro en mapas de las especies presentes en un área específica**

Existe el método IAP (índice de pureza atmosférica, por sus siglas en inglés), el cual se basa en la distribución cuantitativa y cualitativa de las epífitas en el área investigada. Mediante este método, en Austria y en otros lugares del mundo se han logrado observar correlaciones



positivas de los índices IAP y las concentraciones de SO<sub>2</sub> (Anze *et al.* 2007, Zechmeister y Hochenwallner 2006, Canseco *et al.* 2006, Gombert *et al.* 2006). En Alemania también se desarrolló un método que se basa en cálculos de frecuencia de especies en una muestra (Conti y Cecchetti 2001).

En Costa Rica también se desarrolló un método para estimar la contaminación del aire al medir la cobertura de líquenes de todas las especies presentes en troncos de árboles (Monge-Nájera *et al.* 2002b), que utilizó pruebas de campo en el hábitat urbano de San José, así como simulaciones en el laboratorio. Se encontró que cuando se practican investigaciones ecológicas que requieren de una descripción precisa de la distribución espacial de cobertura de líquenes en troncos de árboles, es recomendable utilizar el método de una plantilla de 10 cm x 20 cm y 100 puntos generados al azar, aplicada a los cuatro lados del tronco. Cuando los líquenes son utilizados únicamente como bioindicadores para darle seguimiento a la contaminación del aire, se recomienda el uso de la plantilla con 50 puntos generados al azar, aplicada al lado con mayor cobertura de líquenes. Esto por cuanto en relación con los otros métodos, se reduce el tiempo y costo en aproximadamente un 50%, pero manteniendo confiabilidades aceptables (Monge-Nájera *et al.* 2002b).

### **1.2.2 Muestreo individual de especies de líquenes y medición de contaminantes que se acumulan en sus talos**

Mediante el muestreo de especies de líquenes es posible realizar estudios a través del análisis directo de los contaminantes en sus talos. Mediante este método es común el transplante de muestras de líquenes a zonas donde no hay líquenes, a causa del alto grado de contaminación. El método se basa en evaluar la salud del talo y su grado de daño, el cual se expresa como un porcentaje de la superficie de talo dañada (Conti y Cecchetti 2001).

### **1.3 Contaminación del aire en Costa Rica**

En el Valle Intermontano Central de Costa Rica, el sistema atmosférico que rige el clima es la Zona de Convergencia Intertropical, con predominio de los vientos alisios con dirección noreste – suroeste (Gómez y Herrera 1986). Esta información se comprobó con los datos meteorológicos del Instituto Meteorológico Nacional en la estación de Sabanilla, San José, los cuales indican, para el periodo comprendido entre los años 1999 y 2007, una dirección predominante de vientos provenientes del noreste durante todo el año (Figura 11 – Anexo 2). Dichos vientos alisios proceden del Caribe y penetran el Valle Intermontano Central a través de la depresión montañosa denominada el Paso de La Palma, la cual se ubica entre el Cerro

Zurquí y el Volcán Irazú. Durante el invierno, estos vientos transportan masas de aire provenientes de frentes fríos que provocan a su paso fuertes precipitaciones pluviales en el sector Atlántico de Costa Rica. A pesar de que se supone que el efecto de estos vientos predominantes acarrea la contaminación atmosférica, hay escasez de información científica en cuanto a la distribución de la contaminación vehicular en la zona urbana de San José (ZUSJ).

La legislación en Costa Rica indica que el aire es patrimonio común y debe utilizarse sin lesionar el interés general de los habitantes de la nación. Por lo tanto, el Estado debe velar por la utilización racional de los elementos ambientales con el fin de proteger y mejorar la calidad de vida de los habitantes, sin comprometer las opciones de las generaciones futuras. Consecuentemente, quien contamine el ambiente o le ocasione daño, será responsable ante la ley.

En Costa Rica no hay políticas claras en cuanto a los ámbitos permitidos de contaminación vehicular del aire. Sin embargo y para tal fin, la calidad del aire en todo el territorio nacional debería satisfacer los niveles permisibles de contaminación vehicular fijados, principalmente, por los artículos 34, 35 y 36 de la Ley de Tránsito por Vías Públicas Terrestres. Según esta ley, también deben reducirse y controlarse las emisiones directas o indirectas, visibles o invisibles, de contaminantes atmosféricos, particularmente los gases de efecto invernadero y los que afecten la capa de ozono, de manera que se asegure la buena calidad del aire.

Los gobiernos locales costarricenses no tienen potestad legal para controlar la contaminación urbana del aire. Para subsanar esto la Municipalidad de San José, mediante su Sección de Parques y Áreas Verdes, se ha dado a la tarea de formular una propuesta de reglamento de arborización urbana. Este tiene como propósito regular las prácticas silviculturales para mantener y usar adecuadamente los parques y las áreas verdes, facilitando un proceso informativo y de sensibilización a la ciudadanía con respecto a los servicios ambientales que brinda una ciudad arborizada.

## 2. Introducción

El crecimiento demográfico y la acelerada urbanización causan deterioro ecológico, problemas ambientales e inciden negativamente sobre el bienestar y la salud de las personas, al igual que sobre la vegetación natural, los cultivos y la fauna. Más del 40% de la población mundial vive en zonas urbanas y se estima que esta población en los países en desarrollo se duplicó entre 1980 y 1999 (Miller 2005). Su incremento requiere del uso de más bienes y servicios que atentan contra la calidad del aire y demás componentes de los ecosistemas. En Costa Rica, como país en vías de desarrollo, se hacen visibles los efectos de ese incremento poblacional, pues durante la última década se ha experimentado un aumento de la contaminación del aire debido a la mala condición y uso excesivo de los combustibles, y al incremento del tráfico vehicular y su mal estado (Estado de La Nación 2006). En el área central del país se concentran los automóviles para uso privado y de servicios, cuya flota es demasiado vieja, con predominio de modelos con 15 años de antigüedad (Pujol 2002). El segundo informe del programa de estudios de la calidad del aire (PECaire) de la ciudad de San José, realizado por la Universidad Nacional (UNA) en cooperación con la Municipalidad de San José (MSJ) durante los años 2004 y 2005 en puntos clave del área metropolitana, reveló que en algunos meses el promedio mensual de contaminación mediante las mediciones de material particulado PM-10, fue superior a la norma nacional de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Rodríguez y Herrera 2005). De igual forma, mediciones efectuadas por la Universidad de Costa Rica (UCR) detectaron áreas en la ciudad de San José donde las concentraciones de óxidos de nitrógeno sobrepasan el valor límite recomendado por la Organización Mundial de la Salud (Estado de La Nación 2006).

Hay evidencias convincentes de que los contaminantes vehiculares afectan la vegetación liquenológica (Lijteroff *et al.* 2009, Fuga *et al.* 2008, Anze *et al.* 2007, Giordani 2007, Jovan 2007, Thormann 2006, Weissman *et al.* 2006, Monge-Nájera *et al.* 2002a, Conti y Cecchetti 2001, Garty *et al.* 2000, Vokou *et al.* 1999). Se ha demostrado ampliamente que la contaminación tiene un claro efecto degradatorio en los líquenes, lográndose documentar estadísticamente los cambios en los porcentajes de cobertura y las variaciones en contaminación para varios años evaluados (Monge-Nájera *et al.* 2002a).

Los problemas actuales de contaminación son una consecuencia del rápido incremento demográfico y del hacinamiento de la población en grandes aglomeraciones urbanas (Fuga *et al.* 2008, Domeño *et al.* 2006, Miller 2005). La forma en que el ser humano ha decidido resolver la convivencia y subsistencia, consumiendo y agotando indiscriminadamente los recursos naturales del planeta, ha probado ser insostenible y fomenta la degradación ecológica. Los

estudios y toma de decisiones en torno a la ecología urbana, la contaminación atmosférica y sus efectos en el calentamiento global, no solo estimulan la relación ser humano-naturaleza, sino que promueven una vida sostenible y agradable. Estas investigaciones deben enfocarse en reducir la degradación cada vez más acelerada del planeta, para conservarlo y protegerlo.

Costa Rica posee en su pequeño territorio una de las mayores concentraciones de biodiversidad del planeta, abarcando al menos un 5% de la biodiversidad mundial (Agenda Siglo XXI 2007). Sin embargo en San José, los habitantes se han acostumbrado a estándares de calidad de vida que perjudican su salud, a consecuencia, entre otros factores, de la contaminación del aire (Estado de La Nación 2006). De ahí la importancia de investigar los patrones de contaminación y sus efectos en los organismos vivos, así como sus posibles formas de mitigación.

La contribución y aporte de esta investigación es utilizar una metodología científicamente comprobada y sencilla, para medir cobertura de líquenes en troncos de árboles y determinar la distribución de la contaminación atmosférica considerando los vientos en el área de estudio. De esta forma se pueden tomar decisiones para el control de la contaminación, así como para mitigar sus problemas asociados en las poblaciones urbanas.

Dada la escasez de información en cuanto a la distribución de la contaminación vehicular en grandes áreas urbanas, a través de la presente investigación se estudiará la distribución espacial de la cobertura de líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica de la ZUSJ.

El tema de la presente propuesta de investigación evidenciará la condición actual de las comunidades de líquenes, por lo que se podrá evaluar el cambio en calidad de aire con respecto a las mediciones realizadas diez años atrás por Monge-Nájera *et al.* (2002a) en la ZUSJ. Se utilizarán los líquenes foliosos de los árboles como bioindicadores para medir la contaminación del aire, similar a como se hizo en una investigación en Macedonia, Grecia, en donde se evaluó en veinte sitios y por un período de diez años, los cambios en las comunidades de líquenes para determinar cualitativamente la calidad del aire (Vokou 1999).

### **3. Objetivos**

Objetivo general:

Evaluar el patrón espacial de la cobertura de líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica de la zona urbana de San José.

Objetivos específicos:

1. Comparar el porcentaje de cobertura de líquenes foliosos en troncos de árboles de la zona urbana de San José y su cambio de cobertura entre las épocas seca y lluviosa.
2. Determinar si hay un patrón de contaminación y si el mismo obedece al recorrido de los vientos dominantes, desde su ingreso al noreste y hasta su salida al suroeste de la zona urbana de San José.
3. Desarrollar un mapa de contaminación para la zona urbana de San José mediante promedios de cobertura de líquenes foliosos en troncos de árboles.

Para delimitar el tema se restringirá la investigación a un período de un año y en la ZUSJ de Costa Rica.

#### **4. Hipótesis**

Se postula que la contaminación atmosférica es menor en las áreas por donde ingresan los vientos (noreste) y mayor a su salida (suroeste) de la ZUSJ. Por lo tanto, los porcentajes de cobertura de líquenes en los troncos de árboles podrían disminuir conforme aumenta la distancia del noreste al suroeste de la ciudad. La cobertura de líquenes también podría disminuir conforme se reduce la humedad ambiental de acuerdo a la época del año.

## 5. Metodología

Mediante fotografías aéreas y en función del uso de suelo con infraestructura urbana, primero se delimitó la zona de muestreo. De esta forma se abarcó el área urbana de San José, comprendida entre las ciudades de Guadalupe al noreste y Escazú al suroeste. Se ubicó el centro de la ZUSJ en las coordenadas 527 850 este y 212 670 norte según el sistema de coordenadas métricas Lambert Costa Rica Norte y a partir de este punto se definió la línea central de una parcela con dirección noreste - suroeste, para representar la dirección de los vientos dominantes de esta área (Figura 12 – Anexo 3). Se definió un punto de referencia ubicado al noreste de la zona urbana, el cual es la intersección de la línea central de la parcela y la frontera al noreste de esta zona. Con el objetivo de obtener parques urbanos con tamaño suficiente para albergar varios árboles con líquenes, se identificaron los parques con un área aproximada mínima de 5.000 m<sup>2</sup> y para minimizar el efecto de borde se limitará el tamaño máximo de los parques a 40.000 m<sup>2</sup>. El ancho de la parcela se definió de manera tal que se obtuvo una población de aproximadamente 200 parques (Figura 12 – Anexo 3). Con la definición del ancho de la parcela y el punto de referencia anteriormente indicado, se obtuvo una línea de referencia al noreste de la zona urbana. Cumpliendo con la convención estadística para análisis de regresión, del área escogida se seleccionaron aleatoriamente una muestra de 40 parques, lo que permitió contar con suficientes datos para generar un mapa preciso con isolíneas de contaminación.

Luego se inspeccionó cada parque escogido para seleccionar 5 árboles con líquenes. Esto por cuanto en función de la especie del árbol y las características de su corteza, no todos los árboles albergan líquenes. Para la selección de los árboles se definió el siguiente criterio objetivo, definiendo los árboles como la unidad experimental y obteniendo un tamaño de muestra de 200 árboles.

Criterio objetivo de selección de los árboles por parque:

1. Identificar árboles con líquenes en cuyo tronco quepa con holgura la plantilla de medición y sea recto en sus primeros dos metros sobre el suelo. Esto por cuanto los troncos inclinados favorecen un lado de evacuación de aguas de lluvia, lo cual influye en la cobertura de líquenes.
2. Realizar una observación objetiva de cobertura de líquenes a 1,5 m sobre el suelo y alrededor del tronco de los árboles con líquenes.
3. Descartar el parque si no se pueden seleccionar 5 árboles con líquenes.

4. Si se descarta el parque, sustituirlo por el siguiente de la lista del muestreo al azar de parques.
5. Si no se descarta el parque, seleccionar a criterio 5 árboles cuyas coberturas de líquenes sean las mayores.

Se creó una plantilla de 10 cm x 20 cm usando el método de 50 puntos generados al azar, mediante la cual se tomaron sistemáticamente las muestras de cobertura de líquenes en cada árbol (Monge-Nájera *et al.* 2002b).

La plantilla se aplicó al lado con mayor cobertura de líquenes de cada tronco de árbol seleccionado, a 1,5 m sobre el nivel del suelo. Por ende, de cada tronco se obtuvo el mayor porcentaje de cobertura de líquenes. Para cada árbol se registró dicho porcentaje de cobertura, así como el número del parque, fecha y época de muestreo. También se marcó con un pin de color el punto de muestreo en cada árbol, para facilitar su identificación a la hora de replicar el muestreo. Por último se tomaron fotografías digitales de cada parque, árbol y costado de muestreo, para dejar un registro histórico del tipo de árbol, así como de la apariencia y distribución de los líquenes.

Se sabe que los líquenes crecen más cuando hay humedad (Umaña y Sipman 2002). Por lo tanto, para contemplar los efectos de la humedad en los líquenes, se realizaron dos muestreos replicados en la ZUSJ, uno al final de la época seca y otro al final de la época lluviosa. Para estos efectos se muestrearon los mismos árboles por parque.

No se consideró el resto de variables tales como diámetro a altura de pecho, luz, temperatura, especie de árbol, tipo de corteza, especie de líquen, cantidad de parches de líquenes por tronco, densidad de árboles por parque y cobertura del árbol, ya que está comprobado que estos factores no alteran considerablemente el efecto de la contaminación atmosférica en los líquenes (Monge-Nájera *et al.* 2002a). Además, ninguno de estos factores forma parte de los objetivos de este estudio.

Para representar gráficamente los efectos de la contaminación atmosférica, el promedio de los porcentajes de cobertura de líquenes por parque y por época, se trasladó a un mapa a escala de la ZUSJ. Mediante el programa ArcGis para sistemas de información geográfica, se obtuvieron isolíneas de contaminación.

Se definieron las siguientes variables:



- Variable independiente: distancia en kilómetros del parque a la línea de referencia al noreste de la zona urbana.
- Variable independiente: época seca ó lluviosa.
- Variable dependiente: porcentaje de cobertura de líquenes en cada muestra.

Las variables distancia en kilómetros a la línea de referencia y porcentaje de cobertura por árbol, se tabularon en una hoja electrónica. Se graficó la dispersión de dicho porcentaje de cobertura en función de la distancia en kilómetros.

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó la versión 4 del programa JMP. Se realizó un análisis de regresión del porcentaje de cobertura en función de la distancia y de la época: lluviosa y seca. El interés fue determinar si los porcentajes de cobertura son significativamente menores en la época seca en comparación con los de la época lluviosa y si el porcentaje de contaminación disminuye con la distancia.

Mediante el mapa de cobertura para la época lluviosa y la superposición de mapas con la información de la densidad de calderas como fuentes puntuales de contaminación, así como las densidades demográfica y vehicular de la ZUSJ, se realizó un análisis comparativo. Para efectos de este análisis se utilizó el mapa para la época lluviosa, ya que el de la época seca contempla los efectos de la degradación de los líquenes por falta de humedad (Umaña y Sipman 2002).

## 6. Resultados

### 6.1 Modelo de regresión ajustado

El porcentaje de cobertura de líquenes foliosos en troncos fue mayor en la época lluviosa (Anexo 4). Al comparar el cambio de cobertura de líquenes entre las épocas de muestreo, hubo una tendencia de reducción en la época seca (Figura 1). Independientemente de la distancia, la cobertura en la época seca fue 6,78 puntos porcentuales menos que en la época lluviosa (Figura 1, Cuadro 1). Además, en la época seca también aumentaron las áreas de menor cobertura (Figuras 2 y 3).

En ambas épocas, lluviosa y seca, fue clara la predominancia de parques poco contaminados al noreste y muy contaminados al suroeste de la ZUSJ (Figuras 2 y 3). Independientemente de la época, la cobertura se redujo del noreste al suroeste 1,34 puntos porcentuales por kilómetro (Figura 1, Cuadro 1).

El valor de  $r^2 = 0,138$  (Cuadro 1) indicó que las variables distancia y época explican el 13,8 % de los cambios en la cobertura.

El análisis de regresión del modelo ajustado entre el porcentaje de cobertura y la distancia, contemplando las épocas lluviosa y seca simultáneamente, determinó que a mayor distancia de la línea de referencia donde el aire está menos contaminado, hay menor cobertura (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Parámetros del análisis de regresión ( $p < 0,05$ ,  $r^2 = 0,138$ )**

Fuente: Elaboración del autor

<b>Término</b>	<b>Estimación</b>	<b>Error Estd</b>	<b>Prop. t</b>	<b>Prob &gt; t</b>
Intercepto	73,169	2,258	32,4	<0,0001
Distancia en km	-1,338	0,39	-3,43	0,0007
Época (lluviosa)	6,775	0,943	7,19	<0,0001

La ecuación de regresión del modelo ajustado es (Figura 1):

$$\% \text{ cobertura} = 73,169 - 1,338 \text{ distancia} + 6,775 \text{ lluviosa}$$

Donde: lluviosa = 1 para la época lluviosa

lluviosa = -1 para la época seca

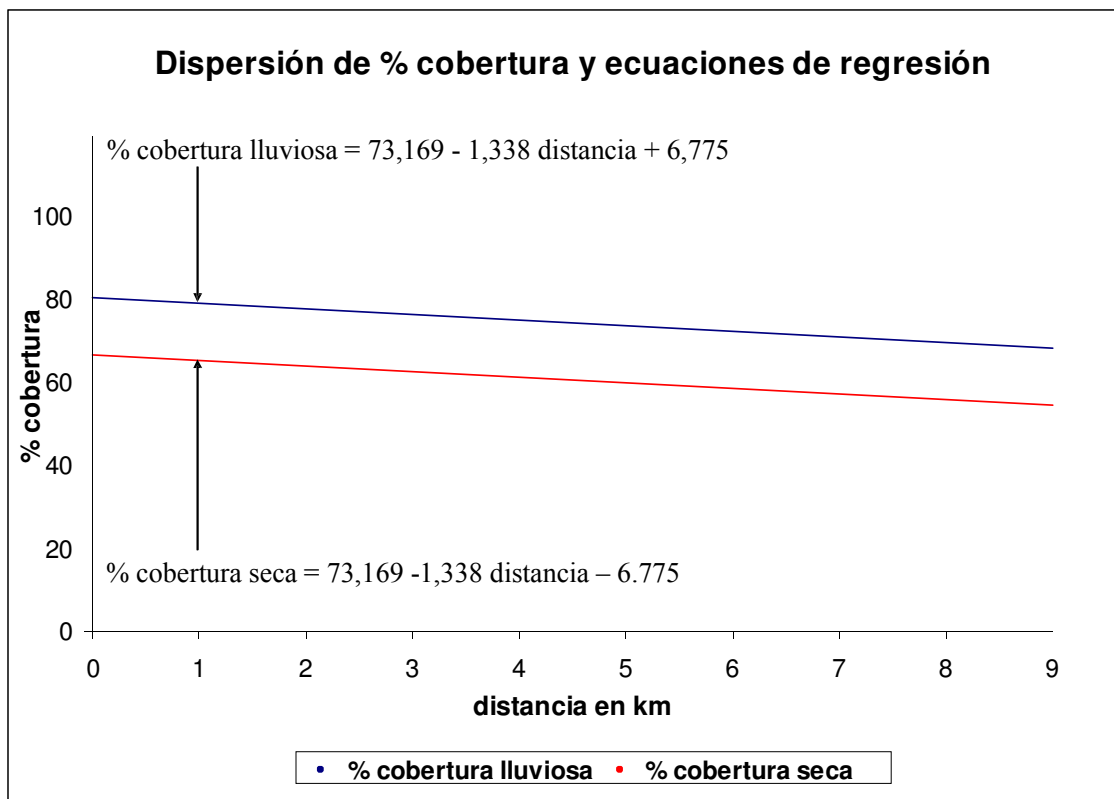


Figura 1. Dispersión de % cobertura con ecuaciones de regresión, 2009.

## 6.2 Mapas

La distribución de la contaminación atmosférica resultó similar para las épocas lluviosa y seca. Sin embargo, en la época seca aumentaron las áreas de menor cobertura (Figuras 2 y 3).

La distribución de la concentración promedio de contaminantes vehiculares (Fundevi 2007) mostró coincidencias con las zonas de baja y alta contaminación atmosférica para la época lluviosa (Figuras 4 y 5). La densidad de calderas como fuentes puntuales de contaminación y la densidad poblacional también mostraron coincidencias con la distribución de la contaminación atmosférica en la época lluviosa (Figuras 6, 7, 8 y 9).

## 6.3 Registro fotográfico

Para las épocas lluviosa y seca se obtuvo un registro fotográfico de todos los parches de líquenes muestreados en cada árbol (Anexo 5 ([www.picasa.com](http://www.picasa.com))).

## 6.4 Pies de figuras

Figura 2. Distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2008.

Figura 3. Distribución de % cobertura para la época seca, ZUSJ, 2009.

Figura 4. Concentración promedio de contaminantes vehiculares por distrito, ZUSJ, 2009.

Figura 5. Comparación de la concentración de contaminantes vehiculares con la distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2009.

Figura 6. Densidad de calderas por distrito, ZUSJ, 2009.

Figura 7. Comparación de la densidad de calderas con la distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2009.

Figura 8. Proyección de población al 2010 por distrito, ZUSJ, 2009.

Figura 9. Comparación de la densidad poblacional con la distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2009.

**Figura 2. Distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2008.**

**Figura 3. Distribución de % cobertura para la época seca, ZUSJ, 2009.**

**Figura 4. Concentración promedio de contaminantes vehiculares por distrito, ZUSJ, 2009.**

**Figura 5. Comparación de la concentración de contaminantes vehiculares con la distribución de % cobertura para le época lluviosa, ZUSJ, 2009.**



**Figura 6. Densidad de calderas por distrito, ZUSJ, 2009.**

**Figura 7. Comparación de la densidad de calderas con la distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2009.**

**Figura 8. Proyección de población al 2010 por distrito, ZUSJ, 2009.**

**Figura 9. Comparación de la densidad poblacional con la distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2009.**

## 7. Discusión

### 7.1 Patrón espacial de contaminación

Los líquenes se degradan a causa de la contaminación atmosférica (Jovan 2007, Thormann 2006, Weissman *et al.* 2006, Monge-Nájera *et al.* 2002a, Garty *et al.* 2000, Vokou *et al.* 1999), y por ende sirven como bioindicadores de esta (Monge-Nájera *et al.* 2002a, Conti y Cecchetti 2001). Se sabe también que los líquenes se desarrollan más en ambientes con mayor humedad (Umaña y Sipman 2002), los cuales en Costa Rica se registran predominantemente durante la época lluviosa (Gómez y Herrera 1986).

A pesar de que mundialmente se han realizado esfuerzos para medir los efectos de la contaminación del aire en los líquenes (Cristofolini *et al.* 2008, Policnik *et al.* 2008, Giordani 2007, Nali *et al.* 2007), aún falta sistematizar los métodos para utilizar los líquenes como bioindicadores. Para efectos de identificar y definir el patrón espacial de contaminación de una zona específica, es más apropiado y práctico utilizar el método que cuantifica la cobertura de líquenes mediante un plantilla aplicada al lado del tronco con mayor cobertura (Monge-Nájera *et al.* 2002b), el cual reflejará el parche con menos degradación. De esta forma y con la representación gráfica mediante mapas con isóneas de cobertura, se le pueda dar seguimiento periódico a la contaminación, de manera rápida, económica y confiable, sin requerir medir los cuatro lados del tronco, que es un método más recomendable cuando se requieran realizar investigaciones ecológicas específicas y más precisas.

En esta investigación, el 13,8 % de la variabilidad de la distribución de la cobertura de los líquenes en la parcela, que es explicado por la distancia y la época, indica que un 86,2 % se explica por variables no contempladas. Sin embargo, por tratarse de un estudio ecológico en ambiente natural con muchas variables no controlables que afectan la cobertura (Conti y Cecchetti 2001), los resultados se consideran aceptables y sirven para tomar decisiones en cuanto al control de la contaminación y la mitigación de sus problemas asociados en las poblaciones urbanas.

Esta investigación generó conocimiento nuevo al determinar que si hay un patrón de contaminación y que el mismo es congruente con el recorrido de los vientos dominantes del noreste al suroeste en la ZUSJ (Gómez y Herrera 1986). Por lo tanto, se validó la hipótesis de que la contaminación atmosférica es menor en las zonas por donde ingresan los vientos, como Guadalupe y Sabanilla, y mayor a su salida, como Mata Redonda, Hatillo y San Sebastián.

No se pudo comparar el presente estado de la comunidad de líquenes con registros de hace 10 años obtenidos por Monge-Nájera *et al.* (2002a), a causa de la diferencia metodológica para obtener las muestras de cobertura. En los registros de Monge-Nájera *et al.* (2002a) se tomaron mediciones en los costados sur, este, norte y oeste de los troncos de árboles, mientras que en esta investigación se registró la mayor cobertura en el perímetro de cada tronco.

## **7.2 Análisis comparativo de la distribución de la contaminación atmosférica**

El registro en mapas de la cobertura de líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica es relativamente nuevo y permite darle seguimiento a su respuesta evolutiva a consecuencia del incremento urbanístico (Shochat *et al.* 2006). El presente estudio sigue la tendencia de los estudios recientes que reportan modelos sobre la recolonización y el reestablecimiento de líquenes en el valle del Ruhr en Alemania (Kricke y Beige 2004), patrones espaciales de abundancia y frecuencia de especies para registrar la contaminación del aire mediante los líquenes como controladores biológicos en Renania del Norte-Westfalia, Alemania (Stapper 2004), así como registros en mapas de los efectos de la contaminación del aire mediante la diversidad de líquenes en el centro de Italia (Loppi 2004). Sin embargo, esta investigación no solo sigue la tendencia mundial en cuanto a las investigaciones liquenológicas para identificar y registrar en mapas los cambios de la vegetación de líquenes en áreas urbanas (Conti y Cecchetti 2001), sino que optimiza su representación al hacer uso de las herramientas de los sistemas de información geográfica para modelar isolíneas de contaminación. De esta forma es factible dar un seguimiento visual integral que permite detectar variaciones en los patrones de contaminación en las zonas de estudio.

Mediante los mapas de % de cobertura se puede inferir la distribución espacial de la contaminación para las épocas lluviosa y seca en la ZUSJ, notándose claramente que la tendencia para ambas épocas es similar, aumentando las zonas de contaminación en la época seca. En estos mapas y para ambas épocas se nota evidentemente que las zonas de Calle Blancos, Mata Redonda, San José centro, San Pedro, Curridabat, San Sebastián y San Francisco de Dos Ríos, son las más contaminadas.

Los contaminantes vehiculares son una fuente importante de contaminación atmosférica (Pujol 2002). En esta investigación, la superposición del mapa de contaminación para la época lluviosa con el mapa de concentración promedio de contaminantes vehiculares muestra que los extremos de la parcela de estudio coinciden, por lo que los contaminantes vehiculares podrían ser una variable que contribuye en estas zonas de baja y alta contaminación atmosférica.

Las calderas también afectan las comunidades de líquenes que estén al alcance de sus emanaciones (Chiras 2006), lo cual quedó registrado en el mapa de la densidad de calderas por distrito de este estudio, al coincidir en ciertas zonas con la distribución de la contaminación atmosférica para la época lluviosa. Por lo tanto, las fuentes puntuales de contaminación también podrían afectar el patrón de contaminación del aire.

Al coincidir en ciertas zonas la densidad poblacional de la ZUSJ con la distribución de la contaminación atmosférica de la época lluviosa, no solo se infiere que la densidad poblacional afecta a la contaminación del aire, sino se confirma que las zonas de alta contaminación afectan las áreas mayormente pobladas (Miranda 2006). Estos factores deben considerarse para enfocar los planes de mitigación y prevención de enfermedades, para contrarrestar los riesgos por dolencias cardiopulmonares a que están expuestas las personas al estar sometidas a exposiciones prolongadas de contaminantes en el aire (Fuga *et al.* 2008).

De los tres mapas de contaminantes vehiculares, densidad de calderas y densidad demográfica, el que mejor coincide con las zonas de alta y baja contaminación atmosférica según la cobertura de líquenes es el de contaminantes vehiculares. Lo anterior apoya también el uso de los líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica vehicular.

### **7.3 Recomendaciones**

En la capital de Costa Rica la principal tendencia de desarrollo e incremento poblacional se da en los cantones ubicados al suroeste de la ZUSJ. De acuerdo con esta investigación y a consecuencia del incremento de la contaminación en este sector, deberían formularse planes reguladores urbanísticos que promuevan una mejor distribución del desarrollo en sectores menos vulnerables a la contaminación atmosférica. Por lo tanto, al noreste debería fomentarse el desarrollo residencial con sus principales requerimientos como escuelas y hospitales, y al suroeste podría desarrollarse los sectores industrial y fabril.

De igual forma debe fomentarse la prevención y detección temprana de enfermedades relacionadas con la contaminación en los pobladores de las zonas más afectadas, tales como Hatillo, San Sebastián y Desamparados, así como considerar la adopción de posibles compensaciones económicas a estas zonas.

Deben promoverse investigaciones que contemplen los efectos de los parques en las comunidades de líquenes y por ende en la contaminación de sus alrededores. La creación de

más parques arbolados, principalmente en los distritos de Hatillo, Desamparados y San Sebastián, podría contribuir a la reducción de su contaminación atmosférica.

En investigaciones futuras con líquenes como bioindicadores de la contaminación atmosférica también podrían estudiarse otras variables no contempladas en este proyecto, como las especies de líquenes y árboles, y aspectos de ecología básica de líquenes como fauna asociada, efectos de factores fisicoquímicos y cambios fisiológicos relacionados con las estaciones climáticas y con la contaminación.

Las iniciativas científicas como la desarrollada en esta investigación deben integrarse en programas urbanos de mediciones de cobertura de líquenes como bioindicadores de la contaminación del aire (Thormann 2006). Los resultados de esta investigación aportan conocimiento útil en procura de la adopción de protocolos para el control del tráfico y la contaminación atmosférica. Para ello se recomienda la utilización del método de control de la contaminación propuesto en esta investigación, mediante la plantilla de 50 puntos generados al azar, aplicada al lado de mayor cobertura (Monge-Nájera *et al.* 2002b).



## 8. Referencias

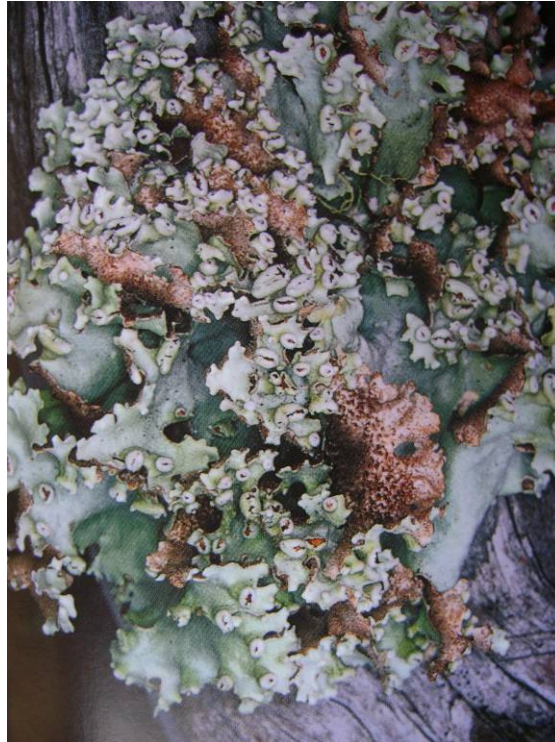
- Agenda Siglo XXI. 2007. Aspectos del desarrollo sostenible referentes a los recursos naturales en Costa Rica. San José, CR. Consultado el 4/4/2008. Disponible en <http://www.un.org/esa/agenda21/natinfo/countr/costaric/natur/htm>
- Anze, R., M. Franken, M. Zaballa, M. R. Pinto, G. Zeballos, M. de los Á. Cuadros, Á. Canseco, A. De la Rocha, V. H. Estellano & S. Del Granado. 2007. Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. Junio. Revista Virtual REDESMA, 1 (1): 54 – 74. Consultado el 28/05/2009. Disponible en <http://revistavirtual.redesma.org/vol1/articulo3.htm>
- Bedregal, P., B. Torres, P. Mendoza, M. Ubillús, J. Hurtado, I. Maza y R. Espinoza. 2005. Uso de *Usnea* sp. y *Tillandsia capillaris*, como bioindicadores de la contaminación ambiental en la ciudad de Lima, Perú. Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Informe Científico y Tecnológico. 151-156. Consultado el 08/05/2009. Disponible en [http://www.ipen.gob.pe/site/publicaciones/2006/ict\\_2005/version%20pdf/\\_Pag%20151-156\\_%20Biomonitores-%20QUIM%20\\_Revisado\\_.pdf](http://www.ipen.gob.pe/site/publicaciones/2006/ict_2005/version%20pdf/_Pag%20151-156_%20Biomonitores-%20QUIM%20_Revisado_.pdf)
- Brighigna, L., A. Papini, S. Mosti, A. Cornia, P. Bocchini & G. Galletti. 2002. The use of tropical bromeliads (*Tillandsia spp.*) for monitoring atmospheric pollution in the town of Florence, Italy. *Rev. Biol. Trop.* 50 (2): 577-584.
- Canseco, Á, R. Anze & M. Franken. 2006. Comunidades de líquenes: indicadores de la calidad del aire en la ciudad de La Paz, Bolivia. *ACTA NOVA*, 3 (2): 286- 307, junio. Consultado el 15/01/2010. Disponible en <http://www.ucbcb.edu.bo/Publicaciones/revistas/actanova/documentos/v3n2/v3.n2.Canseco.pdf>
- Chiras, D.D. 2006. *Environmental Science*. 7th Edition. Jones and Bartlett Publishers, Inc. Sudbury, MA, USA. 642 p.
- Conti, M.E. & G. Cecchetti. 2001. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assesment – a review. *Environmental Pollution* 114: 471–492.
- Conti, M.E., M. Tudino, J. Stripeikis & G. Cecchetti. 2004. Heavy metal accumulation in the lichen *Evernia prunastri* transplanted at urban, rural and industrial sites in Central Italy. *Journal of Atmospheric Chemistry* 49: 83–94.
- Cristofolini, F., P. Giordani, E. Gottardini & P. Modenesi. 2008. The response of epiphytic lichens to air pollution and subsets of ecological predictors: A case study from the Italian Prealps. *Environmental Pollution* 151 (2): 308 – 317.
- Domeño, C., M. Blasco, C. Sánchez & C. Nerín. 2006. A fast extraction technique for extracting polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) from lichens samples used as biomonitors of air pollution: Dynamic sonication versus other methods Aragón. *Analytica Chimica Acta* 569 (1-2): 103–112.
- Estado de La Nación. 2006. Duodécimo Informe (en línea). San José, CR. Consultado el 20/10/2007. Disponible en <http://www.estadonacion.or.cr/Info2006/Paginas/armonia.htm>

- Fuga, A., M. Saiki, M. Marcelli & P. Saldiva. 2008. Atmospheric pollutants monitoring by analysis of epiphytic lichens. *Environmental Pollution* 151 (2): 334-340.
- Fundevi. 2007. Estudio de análisis y prospección del sistema urbano de la Gran Área Metropolitana GAM. Informe final, tomo 2. San José, Costa Rica. 298 p.
- Garty, J., L. Weissman, O. Tamir, S. Beer, Y. Cohen, A. Karnieli & L. Orlovsky. 2000. Comparison of five physiological parameters to assess the vitality of the lichen *Ramalina lacera* exposed to air pollution. *Physiologia Plantarum* 109 (4): 410–418.
- Giordani, P. 2007. Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution* 146 (2): 317-323.
- Golubev, A.V., V.N. Golubeva, N.G. Krylov, V.F. Kuznetsova, S.V. Mavrin, A.Yu. Aleinikov, W.G. Hoppes & K.A. Surano. 2005. On monitoring anthropogenic airborne uranium concentrations and <sup>235</sup>U/<sup>238</sup>U isotopic ratio by Lichen e bio-indicator technique. England, *Journal of Environmental Radioactivity* 84 (3) 333-342.
- Gombert, S., J. Asta & M.R.D. Seaward. 2006. Lichens and tobacco plants as complementary biomonitors of air pollution in the Grenoble area (Isère, southeast France). *Ecological Indicators* 6 (2): 429–443.
- Gómez, L.D. & W. Herrera. 1986. Vegetación y clima de Costa Rica. Tomo II. Editorial Universidad Estatal a Distancia, San José, Costa Rica. 118 p.
- Gorbushina, A.A. 2007. Life on the rocks. *Environmental Microbiology* 9: 1613–1631.
- Grüninger, W. & J. Monge-Nájera. 1988. Use of temperate lichen *Hypogymnia physdes* (Parmeliaceae) to evaluate air pollution in the Tropics. *Rev. Biol. Trop.* 36 (2B): 545-547.
- Jovan, S. 2007. Lichens and nitrogen. *The Bryologist* 110 (2): 333-335.
- Kricke, R. & G.B. Beige. 2004. Changes in epiphytic lichen flora in urban environments. Lichens in a changing pollution environment. *English Nature Research Reports* 525: 27-30.
- Lijteroff, R., L. Lima & B. Prieri. 2009. Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (2) 111-120. Consultado el 08/06/2009. Disponible en [http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/contaminacion/acervo/vol\\_25\\_2/6.pdf](http://www.atmosfera.unam.mx/editorial/contaminacion/acervo/vol_25_2/6.pdf)
- Loppi, S. 2004. Mapping the effects of air pollution, nitrogen deposition, agriculture and dust by the diversity of epiphytic lichens in central Italy. Lichens in a changing pollution environment. *English Nature Research Reports* 525: 37-41.
- Méndez, O. 1977. Los líquenes como indicadores de la contaminación atmosférica en el área metropolitana de San José, Costa Rica. Tesis de licenciatura. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica. 60 p.

- Méndez, O. & L. Fournier. 1980. Los líquenes como indicadores de la contaminación atmosférica en el área metropolitana de San José, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop.* 28 (1): 31-39.
- Miller, J.R. 2005. Biodiversity conservation and the extinction of experience. *Trends Ecol. Evol.* 20 (8): 430-433.
- Miranda, J.J. 2006. Impacto económico en la salud por contaminación del aire en Lima Metropolitana. Instituto de Estudios Peruanos. Lima, Perú. 38 p.
- Monge-Nájera, J., M.I. González, M. Rivas & V.H. Méndez. 2002a. Twenty years of lichen cover change in a tropical habitat (Costa Rica) and its relation with air pollution. *Rev. Biol. Trop.* 50: 309-319.
- \_\_\_\_\_. 2002b. A new method to assess air pollution using lichens as bioindicators. *Rev. Biol. Trop.* 50: 321-325.
- Monnet, F., F. Bordas, V. Deluchat, P. Chatenet, M. Botineau & M. Baudu. 2005. Use of the aquatic lichen *Dermatocarpon luridum* as bioindicator of copper pollution. Accumulation and cellular distribution tests. *Environmental Pollution* 138 ( ): 456 – 462.
- Nali, C., E. Balducci, L. Frati, L. Paoli, S. Loppi & G. Lorenzini. 2007. Integrated biomonitoring of air quality with plants and lichens: A case study on ambient ozone from central Italy. *Chemosphere* 67 (11) 2169–2176.
- Policnik, H., P. Simoncic & F. Batic. 2008. Monitoring air quality with lichens: A comparison between mapping in forest sites and in open areas. *Environmental Pollution* 151 (2): 395 – 400. Consultado el 17/06/2009. Disponible en [http://nstl1.nstl.gov.cn/pages/2008/19/67/151\(2\).pdf](http://nstl1.nstl.gov.cn/pages/2008/19/67/151(2).pdf)
- Pujol, R. 2002. Estudio de indicadores urbanos en el área metropolitana de San José. Flota vehicular. ProDUS-UCR, San José, Costa Rica.
- Rodríguez, S & J. Herrera. 2005. Resumen segundo informe de calidad del aire de la ciudad de San José 2004-2005. Municipalidad de San José y Universidad Nacional, San José, Costa Rica. 11p.
- Rojas-Fernández, J. A., A. Balza-Quintero, V. Marcano, P. A. Rojas, D. Dávila-Vera, Z. Peña-Contreras, R. V. Mendoza-Briceño & E. Palacios-Prü. 2008. Metabolitos secundarios de líquenes de la zona nival de la Sierra Nevada de Mérida-Venezuela y su papel en la absorción de la radiación ultravioleta. *Anales del Jardín Botánico de Madrid*, 65 (1): 59-72. Consultado el 15/01/2010. Disponible en <http://rjb.revistas.csic.es/index.php/rjb/article/view/246/242>
- Shochat, E., P. Warren & S.H. Faeth. 2006. Future directions in urban ecology. *Trends Ecol. Evol.* 21: 661-662.
- Stapper, N.J., 2004. Mapping aerial hypertrophication with epiphytic lichens as biomonitors in North Rhine-Westphalia (NRW, Germany). *Lichens in a changing pollution environment. English Nature Research Reports* 525: 31-36.

- Thormann, M.N. 2006. Lichens as indicators of forest health in Canada. *The Forestry Chronicle* 82 (3):335-343.
- Umaña, L. & H. Sipman. 2002. *Líquenes de Costa Rica*. Instituto Nacional de Biodiversidad, Heredia, Costa Rica. 156 p.
- Vokou, D., S. Pirintsos & S. Loppi. 1999. Lichens as bioindicators of temporal variations in air quality around Thessaloniki, northern Greece. *Ecological Research* 14 (2), 89–96.
- Weissman, L., M. Fraiberg, L. Shine, J. Garty & A. Hochman. 2006. Responses of antioxidants in the lichen *Ramalina lacera* may serve as an early-warning bioindicator system for the detection of air pollution stress. *Microbiol. Ecol.* 58: 41–53.
- Zechmeister, H.G. & D. Hochenwallner. 2006. A comparison of biomonitoring methods for the estimation of atmospheric pollutants in an industrial town in Austria. *Environmental Monitoring and Assessment* 117: 245–259.

**Anexo 1. Fotografía del líquen *Lobaria pallida***



**Figura 10. Líquen *Lobaria pallida* (Umaña y Sipman 2002).**

## Anexo 2. Datos meteorológicos

<b>CIGEFI-SABANILLA-</b>														
INSTITUTO METEOROLOGICO NACIONAL GESTION DE INFORMACION Y COMERCIALIZACION PROMEDIOS MENSUALES DE DATOS CLIMATICOS														
ESTACION	CIGEFI	No.84139			Lat.09° 56' N			Long. 84° 03' O			Altitud 1200 m.			
Elementos	Periodos	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiem.	Octubr.	Noviem.	Diciem.	Anual
LLUVIA	1999-07	15,0	11,1	9,8	48,9	231,2	254,8	195,9	252,5	333,0	302,3	147,7	42,5	1844,7
DIAS LLUVIA	1999-07	6	3	4	9	22	23	21	24	25	26	20	9	192
TEM.MAX.	1999-07	23,3	24,2	25,3	26,0	26,3	26,1	25,4	25,7	26,4	25,8	24,3	23,7	25,2
TEM.MIN.	1999-07	15,5	15,5	15,8	16,5	17,3	17,2	17,0	16,9	16,6	16,8	16,4	15,9	16,5
TEM.MED,	1999-07	19,4	19,9	20,6	21,3	21,8	21,7	21,2	21,3	21,5	21,3	20,4	19,8	20,8
VIENTO	1999-07	14,1	14,6	14,0	11,9	9,0	8,0	8,0	7,9	7,2	7,1	9,6	11,6	10,3
HUMEDAD	1999-07	81	79	80	80	87	87	87	87	87	88	86	82	84
Lluvia en Milímetros - 1Mm. = 1 Litro por m <sup>2</sup> . Viento en K/k. Temperaturas en Grados Celsius Datos preliminares														
Elaboró: Ærak Humedad Relativa en % NE todo el año Días Con lluvia >= a 0,1 Estación Automática Operada por la UCR.														

**Figura 11. Datos meteorológicos del Instituto Meteorológico Nacional en la estación de Sabanilla, San José, durante el periodo comprendido entre los años 1999 y 2007.**

## Anexo 3. Parcela

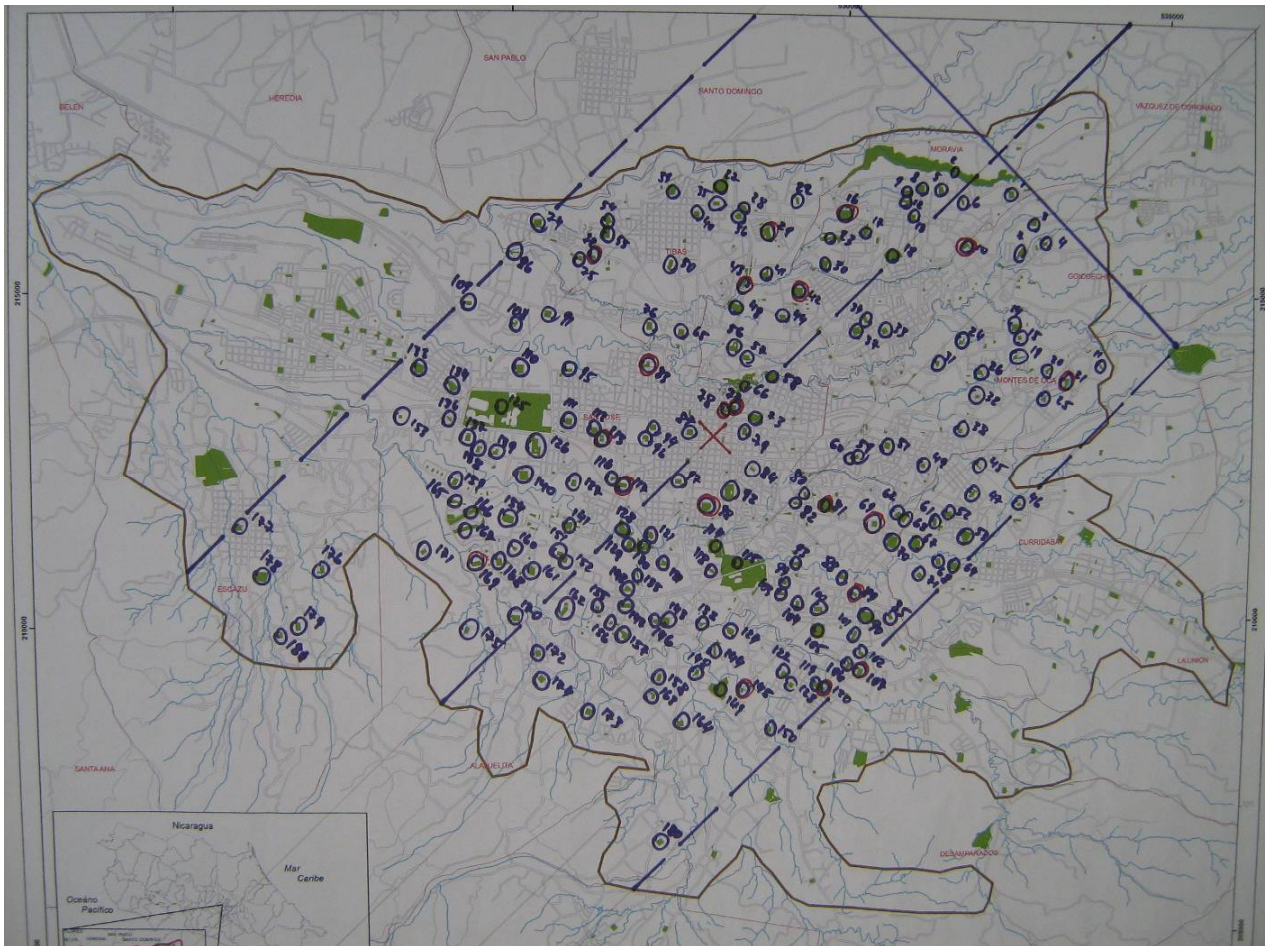


Figura 12. Parcela con dirección noreste - suroeste, según los vientos predominantes en la zona urbana de San José, con identificación y muestra al azar de parques, 2008.

### Anexo 4. Resultados del muestreo

**Cuadro 2. Distancia del parque en km y % de cobertura de líquenes para las épocas lluviosa y seca**

Fuente: Elaboración del autor

Parque #	Nombre del Parque	Árbol #	% Cobertura Lluviosa	% Cobertura Seca	Distancia en km
1	Jardines de San Blas de Moravia	1	90	66	0,500
1		2	94	78	0,500
1		3	66	56	0,500
1		4	74	54	0,500
1		5	76	58	0,500
2	Alto de Guadalupe	1	72	54	1,567
2		2	68	48	1,567
2		3	76	54	1,567
2		4	80	60	1,567
2		5	68	52	1,567
3	Central Moravia	1	90	54	1,752
3		2	64	68	1,752
3		3	96	88	1,752
3		4	96	74	1,752
3		5	64	46	1,752
4	La Marsella Cedros	1	74	56	2,148
4		2	78	46	2,148
4		3	74	48	2,148
4		4	72	54	2,148
4		5	90	58	2,148
5	Central de Sabanilla	1	90	80	2,120
5		2	96	88	2,120
5		3	100	78	2,120
5		4	98	80	2,120
5		5	100	90	2,120
6	Salón Comunal Cedros	1	84	56	2,201
6		2	74	48	2,201
6		3	92	90	2,201
6		4	70	44	2,201
6		5	38	38	2,201
7	Boulevard Sabanilla	1	98	74	2,385
7		2	96	72	2,385
7		3	88	54	2,385



7		4	66	56	2,385
7		5	72	48	2,385
8	Triángulo Marsella	1	100	84	2,592
8		2	100	96	2,592
8		3	98	92	2,592
8		4	92	84	2,5916
8		5	98	82	2,5916
9	La Guaría	1	98	80	2,345
9		2	96	94	2,34466
9		3	96	86	2,34466
9		4	98	84	2,34466
9		5	98	86	2,345
10	Carmiol	1	82	74	2,917
10		2	94	64	2,91693
10		3	64	64	2,91693
10		4	62	62	2,91693
10		5	76	62	2,917
11	Colegio Ing. Agrónomos Moravia	1	64	50	2,748
11		2	58	44	2,74811
11		3	66	38	2,74811
11		4	62	66	2,74811
11		5	82	80	2,74811
12	Buenos Aires Sabanilla	1	98	54	3,220
12		2	64	36	3,220
12		3	64	66	3,21971
12		4	62	56	3,21971
12		5	62	62	3,220
13	Plaza Laureles Lourdes	1	90	76	3,794
13		2	70	56	3,794
13		3	70	40	3,794
13		4	48	34	3,794
13		5	82	50	3,794
14	Los Eucaliptos Guayabos	1	58	50	4,106
14		2	52	50	4,106
14		3	56	50	4,106
14		4	40	36	4,106
14		5	40	30	4,106
15	Llorente Tibás	1	70	56	3,774
15		2	82	52	3,774
15		3	60	32	3,774
15		4	86	80	3,774
15		5	96	82	3,774
16	Santa Mónica Tibás	1	38	30	4,162

16		2	54	44	4,162
16		3	74	44	4,162
16		4	62	50	4,162
16		5	56	40	4,162
17	Colima Tibás	1	90	66	4,603
17		2	80	54	4,603
17		3	66	44	4,603
17		4	74	52	4,603
17		5	90	76	4,603
18	Los Yoses	1	66	54	5,110
18		2	56	54	5,110
18		3	34	34	5,110
18		4	58	46	5,110
18		5	40	26	5,110
19	Escudos Fátima Los Yoses	1	64	64	5,171
19		2	32	30	5,171
19		3	60	54	5,171
19		4	82	82	5,171
19		5	72	70	5,171
20	Estadio Curridabat	1	44	22	5,421
20		2	84	78	5,421
20		3	46	32	5,421
20		4	58	38	5,421
20		5	94	60	5,421
21	Los Faroles Zapote	1	88	80	5,363
21		2	62	48	5,363
21		3	56	42	5,363
21		4	68	58	5,363
21		5	50	42	5,363
22	Nacional San José	1	96	86	5,573
22		2	72	50	5,573
22		3	98	86	5,573
22		4	94	88	5,573
22		5	88	82	5,573
23	Barrio Luján	1	70	62	6,234
23		2	90	86	6,234
23		3	94	78	6,234
23		4	98	84	6,234
23		5	96	88	6,234
24	Central San José	1	28	20	6,372
24		2	56	56	6,372
24		3	54	54	6,372
24		4	72	58	6,372
24		5	32	32	6,372

25	Central San Francisco	1	96	84	6,755
25		2	100	88	6,755
25		3	92	88	6,755
25		4	94	78	6,755
25		5	88	80	6,755
26	Urb. Caribe San Francisco	1	50	44	6,927
26		2	84	70	6,927
26		3	76	60	6,927
26		4	72	54	6,927
26		5	68	58	6,927
27	Japonés de San Francisco	1	86	82	7,194
27		2	72	50	7,194
27		3	72	64	7,194
27		4	70	64	7,194
27		5	78	68	7,194
28	Ministerio de Salud San José	1	90	80	6,865
28		2	90	78	6,865
28		3	66	66	6,865
28		4	76	56	6,865
28		5	48	48	6,865
29	Lomas de San Francisco	1	76	64	7,355
29		2	30	34	7,355
29		3	64	56	7,355
29		4	86	56	7,355
29		5	82	76	7,355
30	Parque CA El Bosque	1	50	38	7,381
30		2	38	34	7,381
30		3	34	18	7,381
30		4	52	48	7,381
30		5	76	68	7,381
31	Santa Marta de San Francisco	1	98	86	7,435
31		2	90	86	7,435
31		3	20	10	7,435
31		4	28	18	7,435
31		5	78	78	7,435
32	Ma. Auxiliadora San José	1	84	76	7,380
32		2	86	68	7,380
32		3	94	88	7,380
32		4	88	84	7,380
32		5	88	78	7,380
33	Gravíleas Desamparados	1	94	80	8,163
33		2	94	84	8,163
33		3	90	84	8,163

33		4	82	64	8,163
33		5	80	62	8,163
34	Sagrada Familia	1	50	48	8,134
34		2	38	22	8,134
34		3	54	44	8,134
34		4	88	56	8,134
34		5	62	60	8,134
35	Parque del Café Rohmoser	1	46	38	8,146
35		2	42	30	8,146
35		3	72	44	8,146
35		4	44	36	8,146
35		5	40	32	8,146
36	Parque del Niño Sabana Sureste	1	82	68	8,397
36		2	90	76	8,397
36		3	62	52	8,397
36		4	96	78	8,397
36		5	86	66	8,397
37	Juan Bautista R. Sabana Sur	1	48	44	8,417
37		2	64	56	8,417
37		3	76	52	8,417
37		4	84	68	8,417
37		5	48	20	8,417
38	Llama Bosque Sabana Sur	1	82	78	8,537
38		2	94	74	8,537
38		3	98	64	8,537
38		4	82	52	8,537
38		5	80	58	8,537
39	Barrio El Prado Sabana Oeste	1	56	32	8,486
39		2	78	56	8,486
39		3	60	34	8,486
39		4	58	46	8,486
39		5	32	34	8,486
40	Jacarandas Sabana Sur	1	78	48	8,565
40		2	64	50	8,565
40		3	56	46	8,565
40		4	52	22	8,565
40		5	96	78	8,565

### **Anexo 5. Registro fotográfico**

El registro fotográfico completo se accesa en [www.picasa.com](http://www.picasa.com), mediante las palabras clave “líquenes lluviosa” y “líquenes seca”. Allí se pueden encontrar fotografías de todos los parques, árboles y parches de líquenes muestreados, para las épocas lluviosa y seca.

## Índice de contenidos

1. Marco Teórico.....	1
1.1 Líquenes como bioindicadores .....	3
1.2 Métodos para medir la contaminación atmosférica mediante líquenes .....	4
1.2.1 Registro en mapas de las especies presentes en un área específica.....	4
1.2.2 Muestreo individual de especies de líquenes y medición de contaminantes que se acumulan en sus talos .....	5
1.3 Contaminación del aire en Costa Rica .....	5
2. Introducción .....	7
3. Objetivos.....	9
4. Hipótesis .....	10
5. Metodología .....	11
6. Resultados.....	14
6.1 Modelo de regresión ajustado .....	14
6.2 Mapas .....	16
6.3 Registro fotográfico.....	16
6.4 Pies de figuras .....	16
7. Discusión .....	25
7.1 Patrón espacial de contaminación.....	25
7.2 Análisis comparativo de la distribución de la contaminación atmosférica .....	26
7.3 Recomendaciones .....	27
8. Referencias.....	29
Anexo 1. Fotografía del líquen <i>Lobaria pallida</i> .....	33
Anexo 2. Datos meteorológicos.....	34
Anexo 3. Parcela .....	35
Anexo 4. Resultados del muestreo.....	36
Anexo 5. Registro fotográfico .....	41

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Parámetros del análisis de regresión ( $p < 0,05$ , $r^2 = 0,138$ ).....	14
Cuadro 2. Distancia del parque en km y % de cobertura de líquenes para las épocas lluviosa y seca .....	36

## Índice de figuras

Figura 1. Dispersión de % cobertura con ecuaciones de regresión, 2009. ....	15
Figura 2. Distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2008.....	17
Figura 3. Distribución de % cobertura para la época seca, ZUSJ, 2009. ....	18
Figura 4. Concentración promedio de contaminantes vehiculares por distrito, ZUSJ, 2009. ....	19
Figura 5. Comparación de la concentración de contaminantes vehiculares con la distribución de % cobertura para le época lluviosa, ZUSJ, 2009.....	20
Figura 6. Densidad de calderas por distrito, ZUSJ, 2009. ....	21
Figura 7. Comparación de la densidad de calderas con la distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2009. ....	22
Figura 8. Proyección de población al 2010 por distrito, ZUSJ, 2009. ....	23
Figura 9. Comparación de la densidad poblacional con la distribución de % cobertura para la época lluviosa, ZUSJ, 2009. ....	24
Figura 10. Líquen <i>Lobaria pallida</i> (Umaña y Sipman 2002). ....	33
Figura 11. Datos meteorológicos del Instituto Meteorológico Nacional en la estación de Sabanilla, San José, durante el periodo comprendido entre los años 1999 y 2007.....	34
Figura 12. Parcela con dirección noreste - suroeste, según los vientos predominantes en la zona urbana de San José, con identificación y muestra al azar de parques, 2008.....	35