

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA



“Líquenes como bioindicadores de contaminación aérea en el corredor metropolitano  
Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur, en la ciudad de Guatemala”

Gretchen Marie Cohn Berger

Bióloga

Guatemala, Marzo 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA



“Líquenes como bioindicadores de contaminación aérea en el corredor metropolitano  
Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur, en la ciudad de Guatemala”

INFORME DE TESIS

Presentado por  
Gretchen Marie Cohn Berger

Para optar al título de  
Bióloga

Guatemala, Marzo 2014

## JUNTA DIRECTIVA

Dr. Oscar Cóbar Pinto	Decano
Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto	Secretario
Lic. Liliana Magaly Vides Santiago de Urizar	Vocal I
Dr. Sergio Alejandro Melgar Valladares	Vocal II
Lic. Rodrigo José Vargas Rosales	Vocal III
Br. Lourdes Virginia Nuñez Portales	Vocal IV
Br. Julio Alberto Ramos Paz	Vocal V

## **DEDICATORIA**

A todos los científicos dedicados al estudio de la vida, que con escasos recursos, buscan el conocimiento, para un mayor entendimiento de nuestro entorno.

A todas las personas interesadas en conocer un poco más acerca de este increíble grupo de organismos.

*“Temporada de líquenes con raíces en mi vida,*

*Prolonga tus jardines hasta el fin de mis días”*

*-Julio de la Vega-*

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por proteger siempre a mi familia.

A mis papas por su incansable apoyo e inagotable amor.

A mis hermanos por su incondicional ayuda.

A mis abuelitos por su entusiasmo e interés hacia mi trabajo.

A mis asesores, Roselvira por su tiempo, Marito por su apoyo, Dr. Robert Lücking por compartir sus conocimientos y en especial a Maura por estar presente en cada etapa del estudio, por su tiempo, valiosos aportes y por ayudarme a encontrar el enfoque necesario.

A quienes me apoyaron en el desarrollo de mi tesis: Vale, Pato, Maura, Rosa, Rodolfo, Jorge, Niko y Mama por su apoyo en los muestreos; al Herbario USCG por permitirme utilizar las instalaciones y equipo; a Maura, Pato, Javier, Rodolfo y Fernando por su ayuda en el análisis de datos.

A Carolina y al personal del CECON- Jardín Botánico por su cariño y motivación.

A Pato y Didi por su valiosa amistad durante todos estos años.

## INDICE

1.	RESUMEN . . . . .	6
2.	INTRODUCCIÓN . . . . .	7
3.	ANTECEDENTES . . . . .	9
3.1	¿Qué es un líquen? . . . . .	9
3.1.1	Definición de líquen . . . . .	9
3.1.2	La simbiosis líquénica . . . . .	9
3.2	Morfología de los líquenes . . . . .	11
3.2.1	Estructura del talo. . . . .	11
3.2.2	Formas de crecimiento . . . . .	12
3.3	Reproducción y dispersión . . . . .	13
3.3.1	Reproducción asexual: estructuras vegetativas . . . . .	13
3.3.1	Reproducción sexual: estructuras reproductivas . . . . .	13
	• Figura 1 Ciclo reproductivo de un líquen. . . . .	15
3.4	Hábitat, distribución y ecología. . . . .	15
3.4.1	Hábitat y sustratos . . . . .	15
3.4.2	Distribución en el trópico . . . . .	17
3.4.3	Importancia ecológica . . . . .	17
3.5	Nutrición y metabolismo . . . . .	19
3.5.1	Fisiología . . . . .	19
3.5.2	El rol del agua . . . . .	19
3.5.3	Nutrición mineral . . . . .	19
3.6	Sustancias líquénicas . . . . .	20
3.6.1	Metabolitos . . . . .	20

3.6.2	Función de las sustancias liquénicas	20
3.6.3	Utilidad e importancia económica de las sustancias liquénicas	20
3.7	Sistemática	22
3.7.1	Taxonomía	23
3.7.2	Filogenia	23
	• Lámina con las Figuras No. 2-9	24
	• Lámina con las Figuras No. 10-17	25
	• Lámina con las Figuras No. 18-25	26
	• Lámina con las Figuras No. 26-31	27
3.8	Líquenes como monitores ambientales.	28
3.8.1	Líquenes para biomonitoreo	29
3.8.2	El método del Índice de Pureza Atmosférica (IPA).	30
3.9	Estudios anteriores	31
3.10	Calidad del aire en Guatemala.	34
3.10.1	Principales contaminantes en el aire de la ciudad de Guatemala	35
3.10.2	Causas y eliminación de contaminantes	35
3.10.3	Impacto de la contaminación del aire en Guatemala	36
3.10.4	Muestreos de la calidad del aire	37
3.11	Zona de estudio	39
	• Tabla 1. Descripción de los puntos de muestreo	40
4.	JUSTIFICACIÓN	41
5.	OBJETIVOS.	43
5.1	General	43
5.2	Específicos	43

6.	HIPÓTESIS . . . . .	44
7.	MATERIALES Y MÉTODOS . . . . .	45
	7.1 Diseño . . . . .	45
	• Tabla 2. Cantidad de árboles por área de muestreo . . . . .	45
	7.2 Fase de campo . . . . .	46
	• Figura 32. Esquematización del muestreo . . . . .	46
	7.2.1 Técnica de colecta. . . . .	46
	7.3 Fase de laboratorio . . . . .	47
	7.4 Análisis de resultados . . . . .	49
	7.4.1 Diversidad . . . . .	49
	• Tabla 3. Fórmulas de diversidad . . . . .	49
	7.4.2 IPA . . . . .	49
	7.4.3 IPA utilizando cobertura . . . . .	50
	7.4.4 Factor de clasificación ambiental (ECF) . . . . .	51
	• Tabla 4. Sistema de ordenamiento para la escala de ECF . . . . .	51
	7.4.5 Análisis de la comunidad . . . . .	52
	7.4.6 Análisis de especies indicadoras . . . . .	52
8.	RESULTADOS . . . . .	53
	8.1 Riqueza y diversidad . . . . .	53
	• Tabla 5. Líquenes presentes en cada punto de muestreo . . . . .	54
	8.2 IPA y ECF . . . . .	56
	8.3 Patrones de la comunidad liquénica . . . . .	56
	• Tabla 6. Valores de riqueza, cobertura y formas de crecimiento . . . . .	57
	• Tabla 7. Valores del IPA y del ECF . . . . .	58

•	Figura 33. Mapa de la ciudad de Guatemala utilizando IPA	.	59
•	Figura 34. Mapa de la ciudad de Guatemala utilizando IPA+cobertura		60
•	Figura 35. Mapa de la ciudad de Guatemala utilizando la escala ECF		61
•	Figura 36. Dendograma de los 32 puntos de muestreo	.	62
•	Figura 37. Modelo de ordenación del NMDS	.	62
	8.4 Especies de líquenes como bioindicadoras de áreas urbanas	.	63
•	Tabla 8. Valores de Q para cada especie	.	63
•	Figura 38. Mapa de la ciudad de Guatemala	.	64
9	DISCUSIÓN	.	65
10	CONCLUSIONES.	.	71
11	RECOMENDACIONES	.	72
12	REFERENCIAS	.	73
13	ANEXOS	.	79

## 1. RESUMEN

El incremento en las sustancias tóxicas a la atmósfera en ciudades altamente pobladas conlleva a un empeoramiento paulatino de la calidad del aire, afectando los ecosistemas y la salud humana, donde la ciudad de Guatemala no es la excepción. Por lo tanto, es necesaria la incorporación de un sistema de monitoreo que sea económico y permita identificar las áreas de la ciudad con altos índices de contaminación, y posteriormente tomar medidas adecuadas para su mitigación. En este sentido, el presente estudio categorizó los niveles de contaminación aérea por medio del Índice de Pureza Atmosférica (IPA), complementado con coberturas, el Factor de Clasificación Ambiental (ECF) y el cambio en la diversidad de líquenes en árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia* D. Don.) en 32 puntos del corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur (HN-HS), en la ciudad de Guatemala.

Se reportan 16 familias, 23 géneros y 65 especies de líquenes, de las cuales 26 son nuevos registros para el país y 5 para la ciudad. Los valores de IPA varían de 4.5 a 25.5 indicando que el corredor HN-HS es homogéneo y posee altos índices de contaminación aérea. En los puntos P5 (INCA) y P13 (Parroquia Santa Marta) se obtuvieron los menores valores de IPA por lo que son los puntos con mayor grado de contaminación aérea; y los puntos P28 (Universidad Marroquín) y P21 (Avenida las Américas 1) obtuvieron los mayores y son las áreas menos contaminadas. La incorporación del valor de cobertura al IPA, permite categorizar las áreas a una escala más fina, dándole mayor peso a especies toxitolerantes y toxisensibles. Estos resultados demuestran que los líquenes pueden complementar mediciones físico-químicas de contaminación aérea, especialmente en puntos en donde no se cuenta con equipo para ello y pueden indicar lugares con problemas ambientales que necesiten investigación instrumental, como los puntos P5 y P13. Así mismo, se proponen 10 especies foliosas de líquenes para ser utilizadas como indicadoras de contaminación aérea en futuras investigaciones.

## 2. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire en la mayoría de las ciudades del mundo se debe a los gases emitidos por motores de combustión, aparatos domésticos para la calefacción y a la industria. Los gases, vapores o partículas sólidas en suspensión perjudican la vida y la salud, tanto del ser humano como de animales y plantas. Por lo que muchos países tienen normas sobre la calidad del aire con respecto a las sustancias peligrosas que éste pueda contener.

La ciudad de Guatemala posee una alta densidad poblacional (1,142 hab/km<sup>2</sup>) y es una importante área de paso que recibe la emisión de 770,000 vehículos que circulan diariamente, generando altos niveles de contaminación causados por el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono, partículas en suspensión, metales pesados, compuestos químicos orgánicos y aproximadamente 1.4 millones de toneladas anuales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y hasta el momento no existe ningún normativo que regule la concentración de contaminantes en el aire y las emisiones de las fuentes (Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social [MSPAS], 1999; Fundación para el Ecodesarrollo y la Conservación [FUNDAECO], 2005; Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2011, 160; Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH], 2013; Álvarez, 2012,5).

Aunque las mediciones de contaminantes por métodos físico-químicos son importantes, no permiten obtener conclusiones sobre los efectos que las concentraciones de contaminantes tienen sobre los seres vivos. Para ello, se utilizan los llamados bioindicadores, que complementan estos métodos, y aportan información acerca de los efectos sobre los organismos. El uso de bioindicadores es el pilar principal en la gestión de la calidad del aire en todo el mundo, y son utilizados para estimar el riesgo de la contaminación ambiental para los ecosistemas y la salud humana (Anze, Franken, Zaballa, Pinto y Zeballos, 2007, 54).

Los bioindicadores tienen la capacidad de ofrecer información sobre el estado del medio en el cual se desarrollan y su acción sobre ellos. Los líquenes (asociación entre un hongo y un alga o cianobacteria) están considerados entre los mejores bioindicadores dado que dependen de la atmósfera para obtener nutrientes minerales, tienen una amplia distribución geográfica y acumulan elementos minerales más allá de lo que necesitan, sin poseer mecanismos de eliminación (Fernández, Terrón y Barreno, 2006, 29; Brodo, Sharnoff y Sharnoff, 2001, 3; Kricke

y Loppi, 2002, 21; Santoni y Lijteroff, 2006, 50). Debido a estas características son particularmente susceptibles a los compuestos tóxicos transportados por el aire, especialmente al anhídrido sulfuroso (que desorganiza las membranas biológicas impidiendo la fotosíntesis), ácido sulfúrico y nítrico, fluoruros, ozono, hidrocarburos y metales pesados como cobre, plomo, zinc, cadmio, níquel, mercurio y cromo. Así, la presencia o ausencia de líquenes es un índice sensible de la contaminación aérea, obteniendo especies toxitolerantes o toxisensibles (Brodo, et al, 2001, 89; Purvis, 2000, 76).

El número de estudios que han utilizado los líquenes como bioindicadores en ciudades del trópico es reducido. En Caracas, Venezuela, Vareschi (1953) categorizó zonas urbanas según la presencia de líquenes. García, Guerrero, Marcell y Saiki (1997) los utilizaron como indicadores de contaminación en la ciudad de Guarulhos, Sao Paulo, Brasil. Barclay (1992) reporta diferencia en la diversidad líquénica en palmas en dos zonas diferentes de contaminación en Belice. Estrabou (1998) estudió la diferencia de la diversidad líquénica en la ciudad de Córdoba, Argentina, y logra reportar especies tolerantes a la contaminación. Bretschneider y Marcano (1995) los utilizan como indicadores de contaminación causada por metales pesados (Hawksworth, Iturriaga y Crespo, 2005, 74). Estos estudios permiten inferir que existe un gran potencial para emplearlos con este objetivo, mediante el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) un índice que supone la disminución en la frecuencia de especies a medida que aumenta la contaminación del aire. En el presente estudio se categorizaron los niveles de contaminación aérea por medio del IPA y del cambio en la riqueza y composición de líquenes en árboles de jacaranda (*Jacaranda mimosifolia* D. Don.) en el corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur, en la ciudad de Guatemala. Se muestrearon un total de 32 puntos, de los cuales 12 eran arriates, 8 parques municipales, 8 áreas residenciales y 4 áreas comerciales.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1 ¿QUÉ ES UN LIQUEN?

##### 3.1.1. Definición de liquen

En 1982 la Asociación Internacional de Liquenología definió a los líquenes como:

“Asociación de un hongo y un simbionte fotosintético, de la cual resulta un talo estable, con una estructura específica” (Purvis, 2000, 6).

Los líquenes u hongos liquenizados están formados por dos componentes u organismos que viven en simbiosis, es decir ambos se benefician. Una parte la conforman las hifas de un hongo que no puede producir su alimento (micobionte o micosimbionte) y la otra parte la conforman las células de un alga verde o una cianobacteria (gonidios, ficobionte o ficosimbionte o fotobionte) que alimenta al hongo. El alimento sintetizado por las algas es aprovechado por los hongos, los cuales ofrecen a aquéllas un hábitat húmedo y protegido. La función principal del hongo, entonces, es proteger al alga de la desecación. Esta simbiosis, a diferencia de otras, forma un talo, el cual no se parece al alga ni al hongo cuando crecen solos, y que se comporta como un organismo independiente (Hale, 1979, 9).

##### 3.1.2. La simbiosis liquénica

La asociación simbiótica entre un micobionte y un ficobionte permite a estos organismos colonizar muchos más hábitats que estando solos. Gracias a esta asociación, el hongo puede vivir en lugares sin materia orgánica, que normalmente necesita como fuente de nutrientes. El alga y la cianobacteria, que usualmente viven en lugares acuáticos o húmedos, son capaces de vivir en lugares secos y con una intensidad lumínica alta (Purvis, 2000, 7).

- **Micobionte:** El micobionte suele ser un ascomiceto. En este caso, los líquenes se denominan ascolíquenes, y presentan las fructificaciones típicas de los ascomicetos. Si presentan peritecios (pirenomicetos) se denominan pirenolíquenes y si desarrollan apotecios (discomicetos) se denominan discolíquenes. Es poco común que el micobionte sea un basidiomiceto. De los 46 órdenes del phylum Ascomycota, 14

incluyen representantes liquenizados, y cinco de éstos presentan solo especies liquenizadas (Will-Wolf, S. et al, 2004, 174-177). Los hongos de los líquenes casi siempre son simbioses estrictos y no son capaces de prosperar en la naturaleza sin el ficobionte apropiado (son simbioses obligados) (Chaparro y Aguirre, 2002, 21). No existe evidencia de que el hongo aporte nutrientes al fotobionte, pero sí facilita el acceso a minerales y micronutrientes, además, modifica al alga y a la cianobacteria, ya que el fotobionte pierde su pared celular y no se reproduce sexualmente (Purvis, 2000, 7). El hongo protege al alga contra la desecación y el calor solar produciendo pigmentos en los tejidos corticales, proporciona al fotobionte gas carbónico de su respiración y retiene agua y minerales en sus tejidos, los cuales toma a través de sus paredes y extrae del sustrato (Chaparro y Aguirre, 2002, 21).

- **Fotobionte:** Solo unas pocas especies de alga forman líquenes, y en raras ocasiones el alga es la parte dominante, como en el caso de *Collema* y *Leptogium* (Figura 2). Por lo general el alga forma un 20% o menos del talo (Purvis, 2000, 9). El alga más frecuentemente encontrada es del género *Trebouxia*. Otras especies pertenecen al género *Trentepohlia* con pigmentación naranja. Las cianobacterias pertenecen casi siempre al género *Nostoc* (Figura 3). El fotobionte fotosintetiza y provee al micobionte de carbohidratos en la forma de polioles para los líquenes que contienen un alga verde, además, las algas verdes también proporcionan tiamina y biotina. Cuando el fotobionte es una cianobacteria, el micobionte obtiene nitrógeno, debido a que la cianobacteria puede fijarlo de la atmósfera, y también obtiene glucosa (Purvis, 2000). Pero cuando el fotobionte es un alga verde, el suministro de nitrógeno es de origen exógeno y a partir de urea, nitratos o aminoácidos. El transporte de compuestos orgánicos depende más de la mediación de algunas sustancias segregadas por el hongo, las cuales facilitan los procesos de difusión, que del contacto entre el micobionte y el fotobionte (Chaparro y Aguirre, 2002, 15-17). El alga determina la apariencia del líquen (color y tamaño), sus funciones y en dónde va a crecer (Purvis, 2000, 13).

## 3.2 MORFOLOGÍA DE LOS LÍQUENES

### 3.2.1. Estructura del talo

Pueden distinguirse dos tipos de talos según la estratificación y la distribución del fotobionte: homómeros (el fotobionte se encuentra irregularmente distribuido entre las hifas del hongo) y heterómeros (estratificados y el fotobionte se encuentra localizado en una capa determinada) (Chaparro & Aguirre, 2002, 36-37). En talos heterómeros se pueden encontrar los siguientes estratos:

- **Capa algal:** Es el sitio en donde se localiza el fotobionte, aquí ocurre el contacto físico entre los dos simbioses (Chaparro y Aguirre, 2002, 41-42).
- **Médula:** Generalmente está formada por hifas con una apariencia algodonosa, laxa y con muchos espacios. Tiene una gran capacidad para almacenar gases y/o sustancias minerales y es la región donde se guarda alimento (manitol), además, permite el intercambio gaseoso del talo (Chaparro y Aguirre, 2002, 42-43).
- **Corteza:** La mayoría de los líquenes poseen corteza superior e inferior y su configuración morfológica y anatómica varía de acuerdo al género. Puede ser lisa en toda su extensión, pulverulenta, pilosa, irregular y de varios colores. Tiene como función básica proteger los tejidos internos, además de constituir una barrera contra la desecación. Algunos poseen pigmentaciones en la corteza superior, probablemente para proteger al fotobionte de excesos de luz (Chaparro y Aguirre, 2002, 43-45)
- **Órganos apendiculares:** Son estructuras vegetativas producidas por el micobionte. Las más comunes son las rizinas que son un manojo de hifas que proporcionan sujeción al sustrato y permiten retener agua (Figura 4). Algunas pueden llegar a ser densamente tomentosas dando una consistencia aterciopelada (Figura 5). Otras estructuras apendiculares son los cilios que se originan en el margen del talo o en la cara superior, los cuales tienen apariencia similar a las rizinas, (Figura 6), son libres y generalmente no ramificados; su función es la de retener gotas de agua que absorben gradualmente (Chaparro y Aguirre, 2002, 45-49).

### 3.2.2. Formas de crecimiento

Los líquenes exhiben una amplia variedad morfológica que se extiende desde los tipos rudimentarios hasta los altamente diferenciados. Los talos pueden ser:

- **Talos rudimentarios (sorediados-granulosos-leproides):** Se desarrollan sobre paredes o rocas, suelos, corteza de árboles y musgos. Presentan frecuentemente colores amarillo o verde limón. El talo está conformado por un micelio suelto, que posee pequeños grupos de algas esparcidas entre las hifas. El aspecto es el de una capa pulverulenta y muchas veces producen fructificaciones (Chaparro y Aguirre, 2002, 25) (Figura 7).
- **Talos filamentosos:** En éstos la morfogénesis está dada por el fotobionte, poseen la apariencia de pelo o de fieltro (Chaparro y Aguirre, 2002, 25-26) (Figura 8).
- **Talos costrosos:** En este caso el hongo predomina en la morfogénesis del liquen. Se caracterizan por presentar una unión íntima con el sustrato ya que no poseen corteza inferior y se adhieren al sustrato mediante la médula. Este tipo de líquenes es común sobre rocas en condiciones ambientales extremas (Chaparro y Aguirre, 2002, 26-29) (Figuras 9-13).
- **Talos foliosos:** Están formados por lóbulos aplanados con simetría dorsiventral, son variadamente lobados o de márgenes enteros, crenados u ondulados, poseen lóbulos imbricados, con o sin cilios, son heterómeros y ocasionalmente homómeros, con o sin corteza inferior. Poseen crecimiento marginal, crecen sobre sustratos variados y se adhieren al sustrato en casi toda su extensión por medio de sus estructuras de fijación (Chaparro y Aguirre, 2002, 29-31) (Figuras 14-16).
- **Talos fruticosos:** Tienen forma de pequeños arbolitos ramificados, poseen simetría radial, algunos son erectos, otros son péndulos y su crecimiento es apical o intercalar. Pueden ser cilíndricos o aplanados y se adhieren al sustrato por un solo punto (Chaparro y Aguirre, 2002, 31-32) (Figura 17 y 18).
- **Talos dimórficos:** Están constituidos por un talo horizontal (talo primario) adherido al sustrato y otro vertical que lleva los cuerpos fructíferos (talo secundario) (Chaparro y Aguirre, 2002, 32-34) (Figura 19).

### 3.3 REPRODUCCIÓN Y DISPERSIÓN

#### 3.3.1. Reproducción asexual: estructuras vegetativas

Los líquenes poseen gran capacidad de reproducción asexual o vegetativa. Por ejemplo, pueden diseminarse por medio de la fragmentación del talo y los fragmentos son dispersados por el viento o los animales y pueden dar origen a un nuevo líquen (Tormo, 2007).

Los líquenes también presentan estructuras especiales de dispersión (diásporas) que se componen del simbiote fúngal y algal y permiten la dispersión directa de las especies sin la necesidad de que el hongo encuentre un fotobionte apropiado para iniciar la liquenización. Existen dos tipos de diásporas: los soredios y los isidios. Los soredios son cuerpecillos microscópicos más o menos esféricos, formados por grupos de algas rodeadas por hifas, que brotan sobre la superficie del talo y presentan un color muy semejante a éste. Se da el nombre de soralios o soralia a los conjuntos de soredios que constituyen masas pulverulentas irregulares o de forma definida sobre la parte superior o el margen del talo (Herrera y Ulloa, 1990, 348) (Figura 20). Pueden ser marginales, laminares, pustulados, granulares, farinosos, labriformes, involutos, etc. y son dispersados por el viento, el agua o animales como arañas, escarabajos, ácaros y hormigas (Chaparro y Aguirre, 2002, 74-75). Los isidios son papilas que se disponen muy apretadamente unas con otras, a manera de glomérulos o verrugas, sobre la superficie superior de algunos líquenes; pueden ser cilíndricos, claviformes, escuamiformes o coraloides. Difieren de los soredios en que los isidios contienen al componente algal y al tejido medular cubierto por una corteza, y los soredios no (Herrera y Ulloa, 1990, 349; Chaparro y Aguirre, 2002, 78) (Figura 21).

#### 3.3.2. Reproducción sexual: estructuras reproductivas.

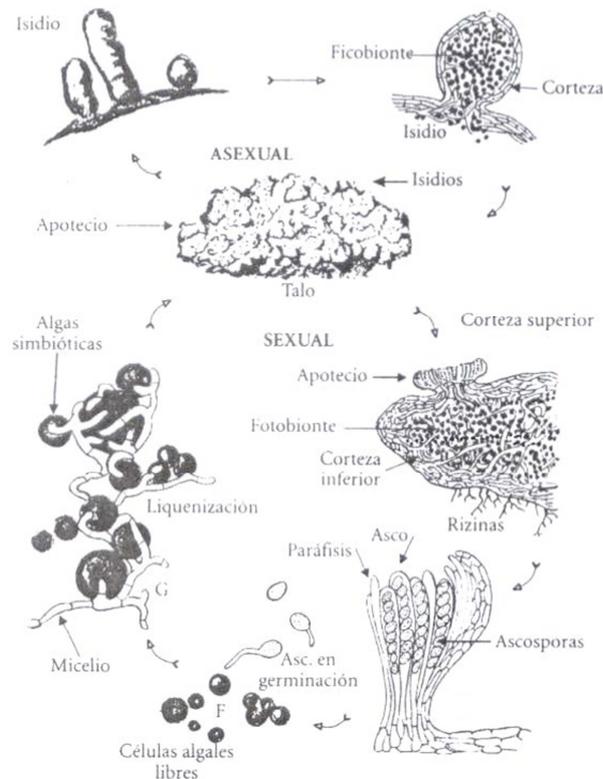
Como cualquier ascomiceto, los líquenes producen cuerpos fructíferos sexuales, que contienen esporas, pero con la diferencia de que en líquenes estos cuerpos fructíferos son perennes, y de larga vida. Se desconoce cómo ocurre la reproducción sexual, ya que nunca se ha observado directamente en el microscopio, pero se cree que es similar a la reproducción sexual en otros hongos (Herrera y Ulloa, 1990, 350). Los ascocarpos son aparatos fructíferos

usualmente superficiales; pueden ser sésiles, más o menos hundidos o estipitados. En cuanto a su posición pueden ser terminales, laterales, encontrarse en los bordes o distribuidos en la superficie. Los tipos más frecuentes son los apotecios, peritecios e histerotecios (lirelas).

- Apotecios: En estos, los ascos están expuestos al exterior; por lo general tienen forma de disco o taza y son circulares en sección transversal. El disco puede ser plano, cóncavo o convexo. Los apotecios pueden ser elevados por un corto pedúnculo (pedunculados), aplicados al talo (sésiles) o un poco hundidos (inmersos o encostrados) (Chaparro, Aguirre, 2002) (Figura 22).
- Peritecios: Tienen forma esférica y están más o menos encerrados por la pared peritecial; los ascos están en una cavidad que se abre al exterior a través de un estrecho poro, el ostiolo (Chaparro, Aguirre, 2002) (Figura 23).
- Histerotecios (lirelas): Son apotecios de forma alargada, estrechos, más o menos sinuosos, a veces ramificados como pequeñas zanjas. (Chaparro, Aguirre, 2002) (Figura 24).

Las ascosporas son muy diversas en forma y tamaño. Pueden estar compuestas de una sola célula o divididas en varias células. Pueden tener forma de grano, ser largas o afiladas, o bien, abultadas y con forma de papa. Varían desde unas micras de largo hasta más de 200  $\mu\text{m}$  de largo y 75  $\mu\text{m}$  de ancho. Las paredes pueden ser delgadas o muy gruesas, lisas o rugosas. Las células de la espora pueden ser cilíndricas, en forma de lente, o angulares. Las paredes pueden ser incoloras o pigmentadas. Algunas esporas están recubiertas por una pared gelatinosa llamada perisporio o halo. Todas estas características son utilizadas para distinguir entre especies, géneros, incluso familias (Brodo et al, 2001, 26).

La reproducción sexual se lleva a cabo por la formación de esporas de origen sexual. Normalmente se producen 8 esporas en cada asca, pero en algunos casos pueden contener una o cientos. Después de la germinación, las esporas necesitan de un alga compatible para formar un nuevo líquen (Figura 1). En general, la reproducción sexual asegura que la población tenga variabilidad genética, lo cual es muy importante para mantener una población saludable y vigorosa. Sin embargo se sabe muy poco acerca de la variabilidad genética en líquenes, no se sabe con qué frecuencia ocurren entrecruzamientos (Purvis, 2000, 20-21).



**Figura.1** Ciclo de reproducción de un líquen (Chaparro y Aguirre, 2002, 86).

### 3.4 HABITAT, DISTRIBUCIÓN y ECOLOGÍA

#### 3.4.1. Hábitat y sustratos

Los líquenes pueden colonizar los más diversos sustratos. Se estima que aproximadamente el 8% del total de la superficie terrestre está ocupada por líquenes (Søchting, 1999, 11). Su vasta distribución geográfica evidencia los eficientes métodos de dispersión que poseen (Coutiño, 1986, 69). Son cosmopolitas, se pueden encontrar en todo tipo de hábitat terrestre capaz de mantener la fotosíntesis, y algunos se pueden encontrar también en hábitats acuáticos; crecen en lugares abiertos o expuestos al sol, en zonas áridas, y no se descomponen cuando se colectan y se secan (Hale, 1979, 25).

El sustrato es el soporte sobre el cual crecen los líquenes. Los diferentes tipos de sustratos influyen sobre el comportamiento de los líquenes de acuerdo con la textura física y la estabilidad, pH, el contenido mineral, la composición química y la capacidad de retención de agua. Los sustratos pueden ser rocas, piedras u objetos de concreto (especies saxícolas o rupícolas), donde inician la formación de un suelo sobre el que podrán crecer luego otros vegetales (Nash, 1996, 17). También crecen en el suelo (terrícolas), madera (lignícolas), sobre briofitas (muscícolas), materia orgánica en descomposición, y en hojas de plantas perennes en los trópicos (folícolas) (Chaparro y Aguirre, 2002, 91) (Figura 25). La mayoría de líquenes están restringidos a ciertos tipos de sustratos, por ejemplo los líquenes que se encuentran en madera son muy raramente encontrados en piedra, por lo tanto la preferencia de sustrato puede ayudar a caracterizar individualmente a las especies (Brodo et al, 2001, 45).

Las cortezas de los árboles pueden variar con respecto a su textura, composición química y capacidad de almacenar humedad, por lo que se pueden encontrar diferentes comunidades de líquenes en diferentes especies de árboles. Los sustratos artificiales que colonizan los líquenes, generalmente se parecen a su sustrato natural, en textura, química y propiedades de retención de agua; así, los líquenes que crecen sobre vidrio son especies asociadas a rocas silíceas duras, los que crecen sobre ropa son encontrados sobre suelo o vegetación muerta, los que crecen sobre metal o plástico son líquenes asociados a rocas o que no presentan preferencia sobre su sustrato (Brodo et al, 2001, 45-53). Existen especies zoobióticas las cuales se desarrollan sobre animales como el exoesqueleto de ciertos insectos y caparazones de tortuga (Søchting, 1999, 7) (Figuras 26-30).

Los líquenes son incapaces de competir con organismos de crecimiento rápido, tales como hierbas o musgos. Los líquenes terrícolas solamente se encuentran en suelos muy poco fértiles, o en donde la temperatura o la sequedad impiden el crecimiento de hierbas. En lugares en donde la precipitación es baja, las piedras y la corteza de los árboles solamente se ven colonizadas por líquenes, pero al incrementar la humedad, los musgos se vuelven más dominantes, aunque algunas especies de líquenes foliosos son capaces de superar en crecimiento a los musgos (Søchting, 1999, 7).

### 3.4.2. Distribución en el Trópico

Se han identificado unas 20,000 especies de líquenes en el mundo, cada una formada por un hongo y un alga distintos, que están distribuidos por todas partes dada su gran capacidad de adaptarse a las condiciones climáticas (Søchting, 1999, 10). Los hongos liquenizados son mucho más conocidos que muchos otros grupos de hongos, con tal vez del 60- 80% de las especies ya descritas, en comparación con el 5% de los hongos que no liquenizan (Will-Wolf et al, 2004, 179).

Algunos géneros de líquenes se distribuyen por todo el mundo, tales como *Chrysothrix*, *Candelaria*, *Parmelia* y *Xanthoria*; otros se encuentran solo en los polos y otros son pantropicales. Los patrones de distribución se ven fuertemente influenciados por la actividad humana, especialmente la contaminación del aire, la destrucción de hábitat, pérdida de continuidad ecológica, la introducción de nuevos sustratos, como edificios, y la propagación de especies exóticas. A diferencia de los patrones de diversidad que presentan las plantas vasculares y hongos, las áreas más ricas en líquenes no son los trópicos, sino los bosques lluviosos sureños, los bosques templados del norte y las zonas de altas latitudes. La zona boreal parece ser la más rica en especies. El sustrato también afecta en la distribución, ya que los líquenes foliícolas son casi exclusivos del trópico (Will- Wolf et al, 2004, 179-180).

La flora de líquenes foliícolas de América Central todavía es poco conocida. Colecciones extensas fueron hechas por Stanley en Honduras y en Costa Rica por Pittier y Tonduz, hacia finales del siglo pasado (Barillas y Lücking; 1992, 298).

### 3.4.3. Importancia ecológica

Los líquenes son de gran importancia como pioneros en la colonización del suelo y rocas desnudas; los ácidos producidos por los líquenes en forma de metabolitos secundarios juegan un papel importante como agentes primarios de la degradación de rocas. Algunas sustancias liquénicas como las depsinas y depsidonas pueden combinarse con minerales de las rocas creando complejos, que hacen a la roca un poco más soluble, lo que acelera el proceso de intemperización causado por el congelamiento y calentamiento, y por las alteraciones químicas

naturales. Esta roca temperizada es el primer paso de la formación de suelos y este proceso puede durar siglos. El ácido carbónico formado por la actividad normal metabólica del líquen es muy poderoso y literalmente puede comerse a las rocas ricas en carbonato de calcio como la piedra caliza. A pesar de que comparten esta habilidad con muchos tipos de algas, cianobacterias y briofitas, los líquenes constituyen el grupo más importante y diverso de invasores primarios de rocas (Brodo et al, 2001, 54). Además son muy importantes para preservar la humedad del suelo, reflejar el calor, agregar materia orgánica y atrapar semillas (Brodo et al, 2001, 55).

Los líquenes colonizan suelos árticos-boreales y regiones alpinas, en donde juegan un papel muy importante como productores primarios. Muchos líquenes contienen cianobacterias que fijan nitrógeno de la atmósfera con el que forman aminoácidos y proteínas. Cuando los talos caen al suelo y se descomponen, se libera amonio y nitrato, que se vuelven disponibles para árboles y hierbas (Sochting, 1999, 11). También se ha demostrado que los líquenes poseen una notable capacidad de resistencia a condiciones ambientales extremas y son los bioindicadores más importantes de la contaminación atmosférica (Moreno, Sánchez y Hernández, 2007, 9).

Hay especies de líquenes que sirven como alimento para algunos herbívoros en bosques boreales y tundra ártica, e incluso para humanos (*Umbilicaria*). Muchos líquenes tienen altos porcentajes de carbohidratos pero bajo contenido proteico. A pesar de que pueden proveer alimento con alto contenido energético durante todo el invierno para los ungulados, estos animales todavía necesitan consumir gramas y arbustos para obtener proteínas, sin embargo, incluso en el verano, los líquenes constituyen un 50% de la dieta del caribú. *Bryoria* y *Usnea* constituyen entre el 80-93% de la dieta de ardillas voladoras en Estados Unidos. También son importantes para algunos roedores y muchos artrópodos terrestres como ácaros, colémbolos, piojos, etc. (Brodo et al, 2001, 60).

Algunos líquenes son utilizados para la elaboración de nidos de aves y mamíferos. (Will-Wolf et al, 2004, 180). Otros sirven de camuflaje, como es el caso de la mariposa del abedul, algunas ranas y salamandras (Brodo et al, 2001, 60-61).

## **3.5 NUTRICIÓN Y METABOLISMO**

### **3.5.1. Fisiología**

Los líquenes son capaces de colonizar ambientes con extrema sequía, temperatura y luz, y por lo general se pueden encontrar en lugares en donde no se encuentran otros organismos vivos. Han desarrollado diferentes maneras para lograr esto: una es la habilidad de apagar sus procesos metabólicos cuando no hay humedad, otra es que tienen un requerimiento limitado de nutrientes. La fisiología de los líquenes varía de acuerdo al tipo de fotobionte, a la morfología del líquen y a la presencia de sustancias (Purvis, 2000, 23).

### **3.5.2. El rol del agua**

Algunos líquenes absorben el agua de la atmósfera, pero debido a que no presentan una cutícula cerosa protectora, tienen poco control sobre su contenido de agua, por lo que son poiquilohídricos. En condiciones de sequía, los líquenes contienen un 15-30% de agua y son metabólicamente inactivos, lo que les permite sobrevivir por largos períodos, incluso hasta varios meses. Sin embargo, en cuanto aumenta la humedad del ambiente, ya sea por lluvias o por rocío, los líquenes absorben agua y en minutos ya están fotosintetizando. Algunos son capaces de fotosintetizar a  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Purvis, 200, 24). Los líquenes pueden fotosintetizar con una humedad relativa de 80% y se ha demostrado que el crecimiento de los líquenes está restringido a los amaneceres neblinosos, cuando la disponibilidad del agua, la intensidad de la luz y la temperatura son óptimas (Purvis, 2000, 25).

### **3.5.3. Nutrición mineral**

Debido a que los líquenes pueden absorber agua y minerales disueltos, a través de cualquier parte de su talo, no necesitan raíces u otro tipo de estructuras absorbentes. Los minerales que requieren los líquenes provienen del aire húmedo o lluvia. Son capaces de concentrar minerales encontrados solamente en trazas en la atmósfera, lo que provee información valiosa para estudios de contaminación aérea (Brodo et al, 2001, 89).

## 3.6 SUSTANCIAS LIQUÉNICAS

### 3.6.1. Metabolitos

Una característica de los líquenes es la presencia en su talo de una gran variedad de sustancias líquénicas, productos derivados de su metabolismo central y periférico, que normalmente se depositan extracelularmente, en forma de cristales. Se han descrito alrededor de 700 sustancias secundarias de los líquenes, y constantemente se descubren nuevos compuestos. El hongo puede producir grandes cantidades de estas sustancias dentro del liquen (hasta un 5% del peso total), mientras que aislado del fotobionte produce cantidades diminutas, o nulas. Los metabolitos secundarios pueden estar presentes en grandes concentraciones, hasta en un 20% del peso seco del liquen (Brodo et al, 2001, 42).

### 3.6.2. Función de las sustancias líquénicas

Los cristales de oxalato de calcio pueden funcionar como sensibilizador óptico distribuyendo la cantidad de luz solar que recibe un liquen, lo cual le ayuda a sobrevivir en ambientes extremos. Las sustancias líquénicas ayudan a aumentar la absorción del agua, al aumentar la permeabilidad de las algas para facilitar el intercambio de nutrientes (glucosa) (Tormo, 2007). La mayoría de sustancias líquénicas son tóxicas, por lo que protegen al liquen de la depredación animal, o del ataque de otros seres de su mismo tamaño, como por ejemplo los hongos, ya que algunas sustancias poseen propiedades antifúngicas (González, 2007).

### 3.6.3. Utilidad e Importancia económica de las sustancias líquénicas

Se ha demostrado que cerca del 57% de las sustancias líquénicas tienen un efecto antibiótico, el 2% de los ácidos líquénicos poseen efecto antiinflamatorio, 13% son antitumorales, un 28% actúan como antimicóticos y otras poseen actividad antiviral (Chaparro y Aguirre, 2002, 100; Moreno et al, 2007, 9).

Los ácidos úsnicos, que son extraídos de especies del género *Usnea*, tienen propiedades antihistamínicas y espasmolíticas. Son utilizados en cremas antisépticas comerciales como

“Usno” y “Evosin”. Se ha reportado que el ácido úsnico es más efectivo en el tratamiento de heridas externas y quemaduras que ungüentos con penicilina. El ácido úsnico también es utilizado para combatir la tuberculosis (Nash, 1996, 130). Las propiedades absorbentes tanto como las antibióticas de *Usnea*, *Alectoria* y *Bryoria* han sido reconocidas independientemente en muchas culturas desde Columbia Británica hasta Nueva Zelanda, en donde estos líquenes son utilizados como emplastos para heridas, pañales para bebés y toallas sanitarias (Brodo et al, 2001, 83).

Algunos polisacáridos, glucanos y glicoproteínas producidos por líquenes, muestran actividad antitumoral, y un polisacárido proveniente de *Umbilicaria esculenta* inhibe el crecimiento de VIH, el virus que causa el SIDA (Brodo et al, 2001, 83). Además, varios metabolitos secundarios de los líquenes pueden actuar como reguladores del crecimiento de las plantas, siendo el ácido úsnico particularmente activo (Nash, 1996, 131).

De algunas especies líquénicas se han extraído colorantes para tela y para papel (papel tornasol), taninos para curtir pieles, teñir lanas, y se emplean como estabilizantes en la elaboración de perfumes y jabones (Chaparro y Aguirre, 2002, 101). Los tarahumaras añaden fragmentos de *Usnea subfusca* y *U. variolosa* para catalizar la fermentación de su bebida llamada tesgüino (Coutiño, 1986, 69-70). El alto contenido de polisacáridos en líquenes hace que se empleen para la fabricación de harinas de fácil digestibilidad (Chaparro y Aguirre, 2002, 101).

Por otro lado, estas sustancias son útiles para la identificación taxonómica de los líquenes. Se realizan pruebas punto para verificar la presencia de ácidos líquénicos mediante cambios en la coloración en el talo y médula (Brodo et al, 2001, 44). Además, también pueden ser utilizados para maquetas arquitectónicas o decoración (Figura 30). Durante la época navideña en algunos países de Europa se comercializan grandes cantidades de *Cladonia* para arreglos decorativos (Chaparro y Aguirre, 2002, 103).

### 3.7 SISTEMÁTICA

#### 3.7.1. Taxonomía

Con el descubrimiento de la simbiosis líquénica, los líquenes fueron gradualmente integrados al sistema de los hongos, donde actualmente se ubican dentro de los filos Ascomycota y Basidiomycota. Se había pensado que la simbiosis líquénica había ocurrido muchas veces durante la evolución, pero estudios recientes indican que ha habido pocos eventos de liquenización y que incluso varias líneas de hongos son secundariamente derivadas de líquenes (Lücking, Sipman y Umaña; sf).

Actualmente los órdenes, familias y usualmente los géneros de los hongos liquenizados están delimitados por características de sus cuerpos fructíferos, lo que resulta en que los líquenes con un talo diferente morfológicamente, son unidos en el mismo género, familia u orden. Las aproximaciones moleculares brindan modificaciones significantes a conceptos morfológicos y químicos de especies de hongos liquenizados. Los metabolitos secundarios también son muy utilizados para su identificación, lo cual ha resultado en debate. Algunas especies definidas morfológicamente pueden incluir dos o más especies crípticas. Líquenes que son idénticos en la mayoría de sus características, pero difieren en que uno se reproduce solo por ascosporas y el otro vegetativamente, se consideran una pareja de especies; sin embargo datos moleculares indican que algunos pares deben ser considerados una sola especie (Will-Wolf et al, 2004, 177-178).

La clasificación y denominación de los líquenes se refiere siempre al micobionte, según está establecido en el Código Internacional de Nomenclatura Botánica (CINB). El hongo determina la naturaleza y forma de la mayoría de los líquenes y produce las estructuras fructificantes, comparables a las de las formas de vida libre (Chaparro y Aguirre, 2002, 20).

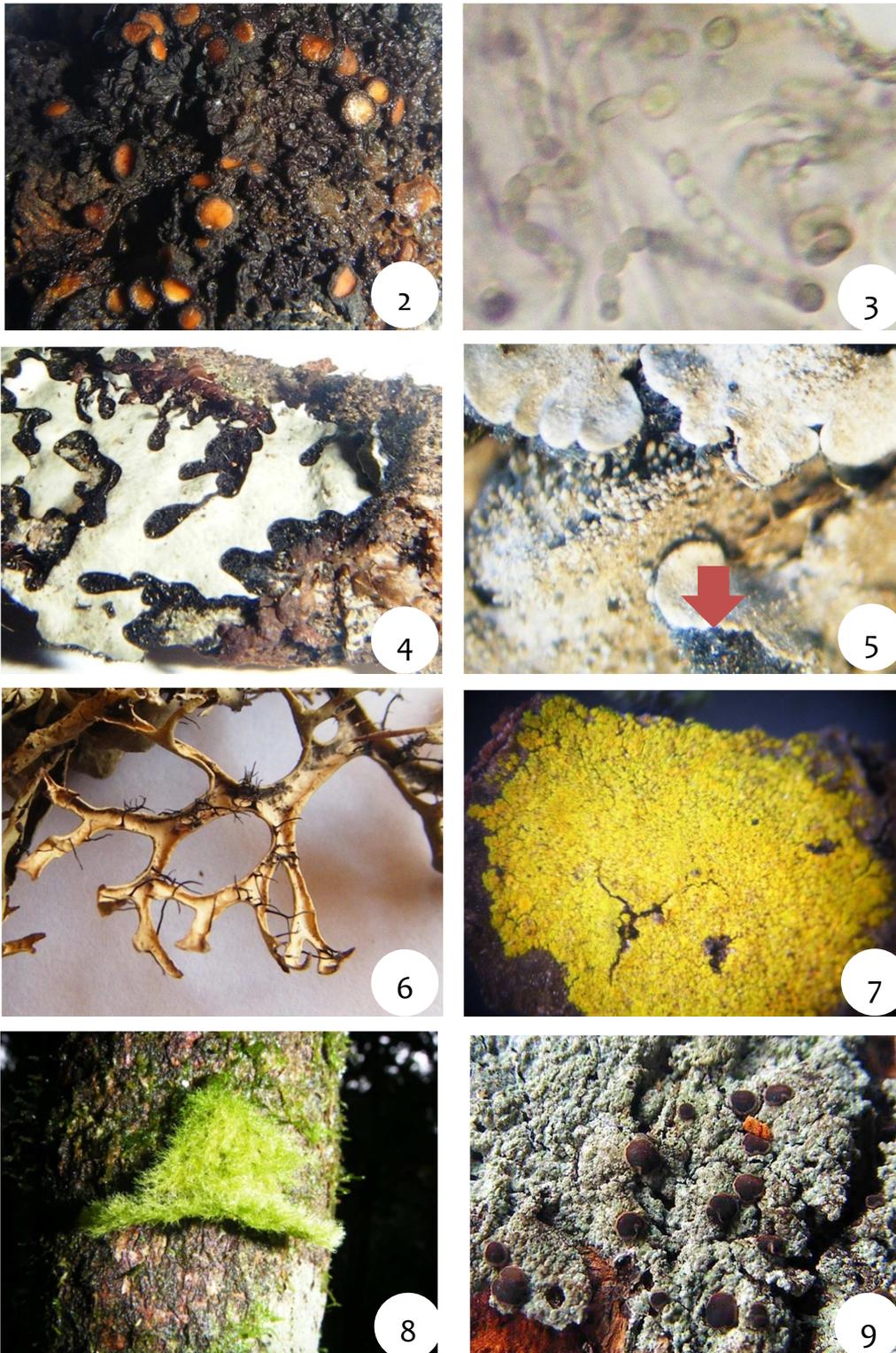
Aproximadamente el 92% de las especies poseen ficobiontes verdes, y un 8% presentan cianobacterias. *Nostoc*, *Scytonema*, *Gloeocapsa* y *Calothrix* son los cianobiontes más comunes. Los géneros de algas verdes *Trebouxia* y *Myrmecia* son específicas de los líquenes (Chaparro y Aguirre, 2002, 17).

### 3.7.2. Filogenia

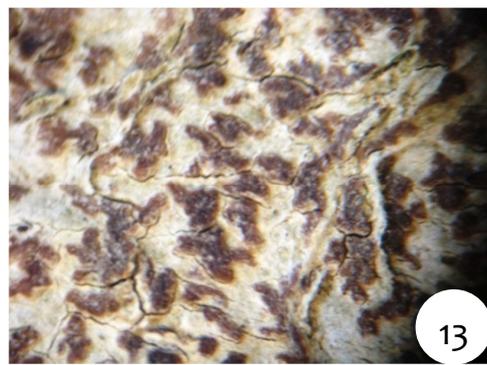
Los líquenes han evolucionado independientemente (polifiléticos) y recientes investigaciones con ADN han confirmado la idea del origen polifilético de los líquenes. En los basidiomicetos la liquenización ha ocurrido por lo menos tres veces, en los ascomicetes se ha demostrado que hay por lo menos cuatro orígenes independientes. En algunos grupos costrosos ha habido liquenizaciones- desliquenizaciones – reliquenizaciones (Purvis, 2000, 47-48).

Phylum Ascomycota	Phylum Basidiomycota
Subphylum Pezizomycotina	Subphylum Hymenomycotina
Clase Sordariomycetes	Clase Agaricomycetes
Subclase Dothideomycetidae	Subclase Agaricomycetidae
Orden Dothideales	Orden Agaricales
Subclase Arthoniomycetidae	Orden Atheliales
Orden Arthoniales	Orden Cantharellales
Clase Lichinomycetes	Orden Polyporales
Subclase Lichinomycetidae	
Orden Lichinales	
Clase Eurotiomycetes	
Subclase Chaetothyriomycetidae	
Orden Chaetothyriales	
Orden Pyrenulales	
Orden Verrucariales	
Clase Lecanoromycetes	
Subclase Acarosporomycetidae	
Orden Acarosporales	
Subclase Ostropomycetidae	
Orden Pertusariales	
Orden Agyriales	
Orden Baeomycetales	
Orden Ostropales	
Subclase Lecanoromycetidae	
Orden Umbilicariales	
Orden Peltigerales	
Orden Teloschistales	
Orden Lecanorales	

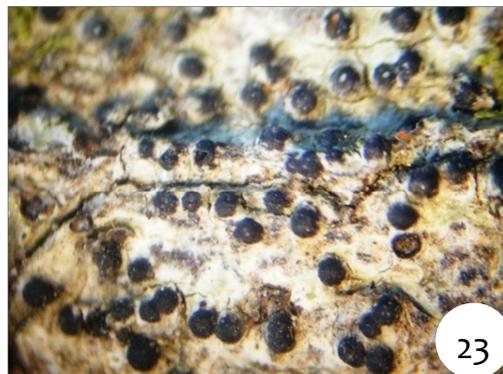
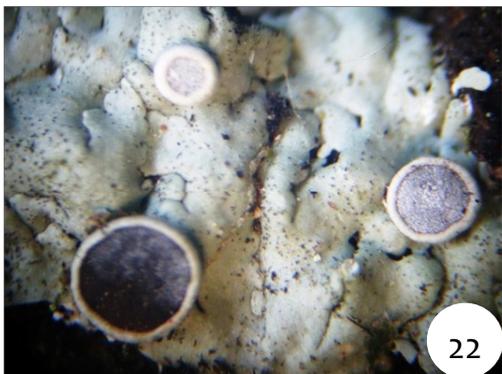
Listado de órdenes de hongos con representantes de líquenes (Lücking et al, sf.).



**Figura 2.** Liquen gelatinoso *Leptogium*. **Figura 3.** Fotobionte *Nostoc*. **Figura No 4.** Rizinas de *Hypotrachyna*. **Figura 5.** Tomento de *Coccocarpia*. **Figura 6.** Cilios de *Everniastrum*. **Figura 7.** Talo rudimentario de *Chrysothrix*. **Figura 8.** Talo filamentoso de *Coenogonium*. **Figura 9.** Talo costroso de *Bacidia*.



**Figura 10.** Talo costroso de *Cryptothecia*. **Figura 11.** Talo costroso de *Graphis*. **Figura 12.** Talo costroso de *Lecanora*. **Figura 13.** Talo costroso de *Arthonia*. **Figura 14.** Talo folioso de *Everniastrum*. **Figura 15.** Talo folioso de *Heterodermia*. **Figura 16.** Talo folioso de *Parmotrema*. **Figura 17.** Talo fruticoso cilíndrico de *Usnea*.



**Figura 18.** Talo fruticoso cilíndrico de *Teloschistes*. **Figura 19.** Talo dimórfico de *Cladonia*. **Figura 20.** *Soralia* que sobresale de un lóbulo. **Figura 21.** *Isidios* rodeando apotecios. **Figura 22.** Apotecios de *Physcia*. **Figura 23.** Aspecto de peritecios vistos al estereoscopio. **Figura 24.** Lirelas de *Graphis*. **Figura 25.** Líquenes foliícolas.



26



27



28



29



30



31

**Figura 26.** Líquenes costrosos creciendo en un tejado. **Figura 27.** Líquenes costrosos creciendo sobre un puente. **Figura 28.** Líquenes costrosos creciendo sobre la pared de una Iglesia. **Figura 29.** Líquenes costrosos creciendo sobre una escultura. **Figura 30.** Líquenes zooibióticos. **Figura 31.** Líquenes utilizados para decoración.

### 3.8 LÍQUENES COMO MONITORES AMBIENTALES

La correlación entre la abundancia de líquenes y ciertas actividades humanas, fue reconocida mucho antes que su naturaleza simbiótica. Erasmus Darwin, el abuelo de Charles Darwin, ilustró en un poema en 1790 sus observaciones sobre los efectos de una mina de cobre y planta de fundición, en la vegetación circundante, incluyendo a los líquenes (Kricke y Loppi, 2002,21).

Se observó que el dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>) era el factor principal que causaba la disminución de la vegetación liquénica en áreas industrializadas y áreas urbanas. Se establecieron escalas de tolerancia al SO<sub>2</sub> en comunidades liquénicas, las cuales fueron utilizadas por toda Europa. Además se presentaron propuestas que estiman cuantitativamente la contaminación aérea. A finales de los años sesenta se desarrolló un método para cuantificar las condiciones ambientales utilizando líquenes como bioindicadores. Este Índice de Pureza Atmosférica (IPA) combina el número de especies en un sitio, con su sensibilidad hacia estresantes ambientales, principalmente contaminación aérea (Kricke y Loppi, 2002,21).

Los líquenes son extremadamente sensibles a la contaminación aérea. Carecen de raíces por lo que dependen de fuentes aéreas de nutrientes. Tampoco tienen cutícula por lo que están completamente expuestos a los contaminantes presentes en el aire. A medida que absorben nutrientes, también absorben dichos contaminantes, los cuales se acumulan en sus tejidos por largos periodos de tiempo ya que los líquenes son relativamente longevos. Además, la superficie, la estructura, y la aspereza del liquen facilitan la interceptación y la retención de las partículas. Su morfología no cambia con el paso de las estaciones, lo cual significa que los líquenes acumulan estas sustancias durante todo el año. Debido a que responden tan claramente ante la presencia de contaminación y ante los cambios del ambiente, los líquenes son utilizados como indicadores biológicos. Varios estudios han mostrado que la abundancia y diversidad de líquenes disminuye a medida que aumenta el desarrollo urbano y la actividad industrial. El dióxido de azufre es un subproducto común durante la combustión de combustibles fósiles y al parecer, interrumpe la fotosíntesis, la transferencia de carbohidratos del alga o cianobacteria al hongo y la respiración. También es uno de los componentes principales de la lluvia ácida, la cual hace que la corteza de los árboles sea menos propicia para el crecimiento de los líquenes, por lo que a medida que aumenta la concentración de dióxido de azufre, disminuye la abundancia de líquenes. Sin embargo las poblaciones de líquenes no desaparecen por completo ya que se ha visto que diferentes especies tienen diferentes niveles

de tolerancia a los contaminantes; algunas pueden sobrevivir en ambientes que están contaminados en forma severa, mientras que otros perecen si las condiciones no son prístinas (Hawksworth, Iturriaga y Crespo, 2005, 72; Kett, Andrachuk y Craig, sf, 2; Moreno et al, 2007, 9)

### **3.8.1. Líquenes para biomonitorio**

El biomonitorio se puede definir como el uso de organismos para obtener información de ciertas características de la biósfera. La información se deduce de cambios en el comportamiento del organismo monitor (composición, riqueza, funcionamiento fisiológico o ecológico y morfología) o de las concentraciones de sustancias específicas en los tejidos del biomonitorio. Con la selección apropiada del organismo, la ventaja del biomonitorio se relaciona con la ocurrencia permanente y común del organismo en el campo, incluso en áreas remotas, con la facilidad del muestreo, y la ausencia de cualquier equipo técnico costoso. De todas las especies biológicas usadas para biomonitorio, los líquenes y los musgos son los más comunes. La morfología de estos no varía con las estaciones, así, la acumulación de contaminantes puede ocurrir a través del año. Estos tienen generalmente longevidad considerable, lo que condujo a su uso como integradores a largo plazo de la deposición atmosférica (Szczepaniak y Biziuk, 2003, 222).

Debido a que los organismos epífitos reciben la mayor parte de sus nutrientes a partir de la atmósfera, son más susceptibles a los factores atmosféricos causados por contaminación atmosférica, eutrofización y cambio climático (Fernández et al, 2006, 29), y por lo tanto, constituyen organismos ideales para ser utilizados como bioindicadores (Hawksworth et al, 2005, 73).

Los líquenes continúan metabolizando a bajas temperaturas por lo tanto son también susceptibles en invierno. Y su tasa de crecimiento es muy lenta por lo que el daño que pueden sufrir no puede ser reparado rápidamente (Verein Deutscher Ingenieure [VDI] 3957, 2004, 3).

Las manifestaciones físicas incluyen el blanqueamiento del talo (seguido de una pérdida de clorofila en las células algales), el desarrollo de una coloración roja (como resultado de la degradación de las sustancias del líquen) o un ennegrecimiento, o la detención del crecimiento.

El talo también puede desarrollar lóbulos, pero disminuye la tasa de crecimiento y es incapaz de producir cuerpos fructíferos (Purvis, 2000, 78).

El hecho de que no todas las especies responden del mismo modo, permite realizar parámetros, ya que los más sensibles o toxisensibles desaparecen con las primeras alteraciones, mientras que las especies toxitolerantes permanecen e incluso algunas aumentan su frecuencia, hasta que llega un nivel de concentración de contaminantes demasiado elevado que provoca su desaparición, produciéndose un desierto liquénico (Fernández et al, 2006, 31; Szczepaniak y Bixiuk, 2003, 222; Purvis, 2000, 76).

### **3.8.2. El Índice de Pureza Atmosférica**

El índice de pureza atmosférica (IPA) permite evaluar la calidad del aire con líquenes, combinando el número de especies presentes en un sitio con la sensibilidad de éstas a ciertos contaminantes ambientales. La fórmula del IPA que utiliza la frecuencia como parámetro de bioindicación ha demostrado ser la más eficaz (Kricke y Loppi, 2002, 1-2).

El IPA se calcula a partir del número de especies de líquenes presentes en un punto de muestreo, y la frecuencia de cada una de ellas en las diferentes localidades de estudio. (VDI 3957, 2004, 11). El IPA para una región en particular puede ser calculado utilizando una fórmula basada en la ocurrencia, abundancia y sensibilidad a la contaminación de distintos líquenes. El índice IPA fue desarrollado por Fabius LeBlank y Jacques De Sloover, en 1970, para un estudio en el área de Montreal. Un mapa de distribución de líquenes o los valores del IPA pueden proveer una imagen clara, no solo de los niveles de contaminación, sino también de su fuente y dirección de movimiento. Cuando los muestreos se repiten periódicamente, el mapeo de los líquenes de antes y después puede demostrar el deterioro o la mejora de la calidad del aire (Brodo et al, 2001, 90).

### 3.9 ESTUDIOS ANTERIORES

En el siglo XIX, los líquenes fueron reconocidos por primera vez como posibles bioindicadores, pero no fue hasta 1960, al ser identificado el dióxido de azufre como el factor principal que influencia el crecimiento, distribución y salud de los líquenes, cuando ocurrió un crecimiento exponencial de los estudios que utilizaban los líquenes como biomonitores, teniéndose hoy en día más de 2.000 trabajos publicados sobre este tema, incluyendo varios libros y una serie acerca de literatura líquénica publicada en “The Lichenologist” (1974-2000). Actualmente se conoce que, además del dióxido de azufre, una amplia gama de otros compuestos (amoníaco, fluoruros, polvo alcalino, metales, metales radioactivos e hidrocarburos clorados), así como la eutrofización y la lluvia ácida, pueden ser detectados y monitorizados utilizando líquenes. En muchos países europeos y en Estados Unidos se utilizan líquenes para monitorizar los efectos causados por contaminación gaseosa y por metales. Hoy en día se les reconoce como bioindicadores de ciertos contaminantes y daños al medio ambiente en la zona templada (Hawksworth et al, 2005, 72).

Szczepaniak y Biziuk, en el 2003, publicaron un artículo que da a conocer el biomonitoreo basado en musgos y líquenes. Está escrito como base para la primera etapa del trabajo de investigación sobre biomonitoreo empleando estos organismos. Este trabajo también indica ventajas y desventajas de varios bioindicadores (Szczepaniak y Biziuk, 2003, 3-7).

Muchos países han realizado investigaciones con líquenes, monitoreando los niveles de metales en éstos, tanto en áreas industriales como en áreas limpias para comparación. Los efectos de la acidez, de la temperatura y de los iones del calcio en la acumulación de metales en líquenes han sido estudiados por Wolterbeek (Szczepaniak y Biziuk, 2003,7).

Varios autores iniciaron el mapeo de las especies líquénicas presentes en las grandes ciudades de todo el mundo, diferenciando zonas de distinto grado de salubridad del aire mediante la presencia o ausencia de ciertas especies de líquenes o por la estructura de los talos (costrosos, foliosos o fruticosos) de las especies presentes. Entre algunas especies detectadas como las más tolerantes en las regiones templadas europeas están *Lecanora conizaeoides*, *Scoliciosporum chlorococcum*, *Amandinea punctata* y *Phaeophyscia orbicularis* al tiempo que

*Lobaria pulmonaria*, *Lobaria amplissima* o especies pertenecientes a *Usnea* se popularizaron pronto como las más sensibles en estas regiones (Hawksworth et al, 2005, 73).

EL número de estudios que han utilizado líquenes como bioindicadores en el trópico es todavía limitado. A pesar de los pocos resultados disponibles, la alta biodiversidad líquénica que existe en los trópicos permite inferir que existe un gran potencial para poderlos emplear con este objetivo. Coppins y Wolseley, en 2002, presentan una síntesis acerca de los diferentes papeles que desempeñan los líquenes en bosques tropicales, incluyendo su papel como indicadores de continuidad ecológica y como indicadores de cambios inducidos por el fuego para el manejo de bosques (Hawksworth et al, 2005, 72).

Vareschi, en 1953, utilizó por primera vez los líquenes como bioindicadores en un país del trópico, mapeando las zonas habitadas por líquenes en Caracas, Venezuela, diferenciando un desierto líquénico, una zona externa, una de conflicto y una normal. Bretschneider y Marcano en 1995 también en Venezuela, utilizaron líquenes como indicadores de contaminación causada por metales pesados y otros agentes. García, Guerrero, Marcell y Saiki, en 1997, realizaron un estudio sobre indicadores de contaminación en la ciudad de Guarulhos, Sao Paulo, Brasil (Hawksworth et al, 2005, 73).

Estrabou estudió, en 1998, las diferencias de la flora líquénica y el porcentaje de su recubrimiento sobre troncos en cuatro zonas de la ciudad de Córdoba, Argentina, con el propósito de establecer un sistema permanente de monitoreo para toda la ciudad. Se encontraron 29 especies en el área control, mientras que ninguna especie estuvo presente en algunas zonas urbanas, las cuales podrían ser consideradas como zonas desérticas. También descubrió que algunas especies de líquenes se desarrollaban mejor en los medios urbanos en donde los niveles de contaminación eran altos en contraste con su desarrollo en áreas rurales. Después de 7 años de monitoreo, encontró que las especies más sensibles a los contaminantes eran *Ramalina eckloni* y *Usnea* sp.; *Parmotrema reticulatum* y *Punctelia hypoleucites* eran especies tolerantes, mientras que *Physcia undulata*, *Hyperphyscia variabilis* e *Hyperphyscia endochrysea* eran resistentes (Hawksworth et al, 2005, 73).

Barclay, en 1992, recolectó 20 especies de líquenes sobre 30 palmas cocoteras en Belice, encontrando diferencias en la distribución de las especies de líquenes al comparar las

encontradas sobre palmas ubicadas a lo largo de la costa y aquellas localizadas tierra adentro (Hawksworth et al, 2005, 74).

Quilhot, Fernández, Rubio, Goddart e Hidalgo, en 1998, demostraron que los líquenes han desarrollado estrategias a nivel químico, a fin de minimizar los daños inducidos por el aumento de las radiaciones UV como consecuencia de la disminución de la capa de ozono de los últimos años, desarrollando una serie de compuestos fotoprotectores, los cuales podrían ser utilizados para estimar las cantidades de radiación UV (Hawksworth et al, 2005, 75).

Lücking en 1997, encontró que de las aproximadamente 334 especies de líquenes foliícolas conocidos en Costa Rica, 213 especies se encontraron en una sola localidad, y 39 sobre una sola hoja. Lücking destacó que los líquenes foliícolas eran especialmente buenos indicadores de factores microclimáticos y de perturbaciones antropogénicas, detectando muchas especies restringidas a bosques primarios. Lücking propuso una lista preliminar de 300 especies de líquenes foliícolas y estableció categorías (índices de valor ecológico) con relación a diferentes tipos de perturbaciones forestales. Algunas especies del género *Badimia*, por ejemplo, mostraron correlación con los bosques menos perturbados en Costa Rica, y se ha recomendado sean utilizadas para identificar lugares con una alta biodiversidad y, por ende, con un valor particular en cuanto a su conservación (Hawksworth et al, 2005, 77).

El uso de líquenes como bioindicadores está tan firmemente vinculado en asesorías ambientales, que los Servicios Forestales y Servicios de Parques Nacionales en Estados Unidos han establecido programas activos de estudios base de la vegetación líquénica en parques nacionales, bosques y áreas de recreación, y también han realizado investigaciones detalladas de la sensibilidad de los líquenes y métodos de muestreo. El gobierno canadiense, a través del Monitoreo Ambiental y Red de Asesorías (EMAN), también ha empezado a investigar el uso de líquenes para programas de monitoreo a larga escala (Brodo et al, 2001, 91-92).

En mayo del 2011 el Dr. Robert Lücking, en conjunto con los participantes del taller “Líquénología tropical”, en el marco del proyecto “Neotropical epiphytic microlichens” financiado por la National Science Foundation (NSF), muestreó líquenes en 5 de las estaciones que monitorea el Laboratorio de la Calidad del Aire de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en diferentes puntos de la ciudad, tomando 4 árboles en cada punto de muestreo.

Esta información indica que existe una alta coincidencia entre los datos obtenidos por medio de líquenes y los datos reportados por el laboratorio de calidad del aire, especialmente para las  $PM_{10}$ . Además se colectaron 49 especies no reportadas para el país de las cuales 8 géneros no han sido reportados, y 16 especies no han sido reportadas para la ciudad. Dicha información no ha sido publicada, fue obtenida a través del Dr. Robert Lücking del Field Museum de Chicago (Comunicación personal, 2013).

Esta investigación sirve de base para futuras investigaciones, ya que si se utiliza la misma metodología en toda la ciudad se puede obtener un mapa bastante completo sobre la contaminación aérea en Guatemala, que era uno de los objetivos del presente trabajo. Con esta información disponible, el método se vuelve más accesible para determinar distintos grados de perturbación en toda la ciudad e incluso el país.

### **3.10 CALIDAD DEL AIRE EN GUATEMALA**

En el año 2011, Guatemala reportó 2,039,924 casos de infecciones respiratorias agudas. Los contaminantes en el aire provienen de fuentes naturales como las erupciones volcánicas, erosiones eólicas e incendios forestales y de actividades humanas provenientes del consumo de combustibles y de procesos industriales. Los gases de efecto invernadero (GEI) son los gases capaces de producir el calentamiento global y el cambio climático; éstos son emitidos por la quema de combustibles fósiles como el carbón mineral, el gas natural, el petróleo y sus derivados y de la quema de productos biomásicos como leña, bagazo de caña, residuos de cosechas, papel y cartón (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN], 2011, 142).

El principal gas GEI generado en Guatemala es el dióxido de carbono, en el año 2005 se emitieron 12,553.74 Gg ( $1Gg=10^9$ gramos) de dicho gas, 271.70 Gg de metano, 55.05 Gg de óxido nitroso, 106.49 Gg de óxidos de nitrógeno, 1,691.87 Gg de monóxido de carbono, 414.58 Gg de compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano y 90.49 Gg de dióxido de azufre. A través de la cobertura boscosa y el suelo del país se absorbieron 24, 492.061 Gg de  $CO_2$ . Guatemala es considerada un país sumidero de carbono, es decir, que las absorciones son mayores que las emisiones de  $CO_2$ . Sin embargo la capacidad de absorción ha disminuido significativamente debido a las altas tasas de deforestación que sufre el país (MARN, 2011, 156).

En la actualidad no se cuenta con una normativa específica que regule la concentración de contaminantes en el aire y las emisiones de las fuentes, por lo que se han utilizado los parámetros dictados por la Organización Mundial de la Salud (OMS) 2005 y la Agencia de Protección Ambiental (EPA). Actualmente se está formulando una Norma de Inmisión de Contaminantes en el Aire orientada a fijar límites de inmisión de contaminantes criterio y metodologías para la localización de puntos de muestreos de la calidad del aire (MARN, 2011, 160; INSIVUMEH, 2013; Álvarez, 2012, 5).

### **3.10.1 Principales contaminantes en el aire de la ciudad de Guatemala**

- Las partículas totales en suspensión (PTS), son partículas diminutas, sólidas y líquidas presentes en el aire en gran número, originadas principalmente por procesos de combustión (Álvarez, 2012, 12).
- Las partículas totales en suspensión en su fracción ( $PM_{10}$ ) son todas aquellas partículas sólidas o líquidas dispersas en el aire con un diámetro menos a 10 micrómetros. Por lo regular se conforman por polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento y polen (Álvarez, 2012, 15).
- Dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) es un gas pardo o rojizo, no inflamable y venenoso. Es un precursor del ozono y la lluvia ácida, que al combinarse con el agua del aire forma ácido nítrico el cual puede provocar deposición o lluvia ácida (Álvarez, 2012, 19)
- Dióxido de azufre ( $SO_2$ ) es un gas incoloro e irritante que se origina principalmente en los procesos de combustión industrial y de transporte cuando se utilizan combustibles con contenidos significativos de azufre, quema de llantas y materiales con hule o gutapercha procesada. Naturalmente se producen por erupciones volcánicas. Reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico componente de la lluvia ácida (Álvarez, 2012, 22).

### **3.10.2 Causas y eliminación de contaminantes**

Las principales causas de contaminación en Guatemala son:

- El parque vehicular

- La generación de energía eléctrica: la producción de electricidad en Guatemala aumentó 40% entre 2001 y 2007. De este porcentaje, el 63% provino de generación térmica (que usa combustibles derivados del petróleo y carbón mineral), y el 36% de la energía producida en el período 2001-2008 provino de fuentes renovables (hidroenergía, geoenergía y bagazo de caña).
- Generación, composición y disposición de desechos sólidos: en 2006 más del 70% del volumen de desechos sólidos se generó a partir de las siguientes actividades: industrias cárnicas (35%), químicas (15%), fabricación de productos minerales no metálicos (10%), cultivos no tradicionales (10%) y tradicionales (5%), el consumo final de hogares generó poco más del 1%.
- Incendios forestales y cambio de uso de la tierra: la agricultura de subsistencia y la expansión de monocultivos son las principales causas de la pérdida y eliminación de cobertura boscosa. Para el año 2010 se estimó una tasa neta de deforestación del 1.0% anual a nivel nacional. Cerca de un 90-95% de la caña cultivada en más de 200,000 ha, es quemada como parte del proceso industrial ([MARN-URL/IARNA-PNUMA], 2009, 75-80).

Existen 4 mecanismos para la eliminación de contaminantes: la sustancia se destruye por su conversión en otra distinta; un contaminante puede ser diluido al mezclarse el aire que los contiene con otro no contaminado; desplazándose por medio de corrientes de aire a otros sitios; la lluvia, la cual ejerce un efecto de lavado de la atmósfera que es muy importante, pues reduce considerablemente los niveles de contaminantes, especialmente de partículas (Suárez, 2004, 10).

### **3.10.3 Impacto de la contaminación del aire en Guatemala**

El Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS) reporta para el año 2011, a nivel nacional, 2,039,924 casos de infecciones respiratorias agudas y una mortalidad por causa respiratoria de 8,781 para todo el país. Las infecciones respiratorias agudas en parte tienen estrecha relación con la calidad del aire que respira la población. Algunos de los contaminantes del aire afectan el sistema respiratorio, como el material particulado, el monóxido de carbono y el ozono troposférico (MARN, 2011, 157; Apxuac, 2005, 25)

Las infecciones respiratorias agudas y las neumonías y bronconeumonías se consideran enfermedades respiratorias de origen ambiental. Entre el 2004 y 2007 las neumonías y bronconeumonías causaron el 18.8% de las muertes en Guatemala, y ocuparon el primer y tercer lugar respectivamente como causas de mortalidad en el país. Las enfermedades respiratorias representan el 25% de los casos de morbilidad general, pero afectan sobre todo a la infancia, representando alrededor del 50% de los casos de morbilidad infantil. Las áreas con mayor incidencia de estas enfermedades como causa de mortalidad son la región metropolitana, la región suroeste (Totonicapán, San Marcos), la región noroeste (Huehuetenango y Quiché) y la región norte (departamento de Alta Verapaz) (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales – Universidad Rafael Landívar/ Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [MARN-URL/IARNA-PNUMA], 2009, 202).

#### **3.10.4 Muestreos de la calidad del aire**

La Escuela de Química de la Universidad de San Carlos con la colaboración y asesoría de Swisscontact inició desde 1994 el monitoreo del aire en la ciudad de Guatemala. Actualmente posee 6 estaciones de medición de calidad del aire en la ciudad de Guatemala: MUSAC (Museo de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Zona 1), HINO (Estación de motores, Zona 7), INCAP (Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá, Zona 11), INSIVUMEH (Estación Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología, Zona 13), EFPEM (Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media, Zona 12), USAC (Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, Zona 12), en donde miden concentraciones de material particulado (MP): Partículas totales en suspensión (PTS) y partículas totales en suspensión en su fracción ( $PM_{10}$ ) y contaminantes gaseosos tóxicos: dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), y dióxido de azufre ( $SO_2$ ), así como la lluvia ácida. Los resultados de estos estudios indican que existe contaminación del aire en los puntos muestreados debido a la detección de todos los contaminantes medidos, obteniendo resultados que sobrepasan los límites de referencia sugeridos por la OMS (Álvarez, 2012, 30; Apxuac, 2005,29; Oliva, 2010,8).

El INSIVUMEH posee un programa de monitoreo de calidad del aire de Guatemala, el cual consta de una red de estaciones en diferentes ciudades de la República de Guatemala, una estación central ubicada en las instalaciones del INSIVUMEH y cuatro remotas, una en la ciudad

de Guatemala, otra en Quetzaltenango, otra en Escuintla y una última en Izabal. Cada estación tiene la capacidad de medir parámetros de NO<sub>2</sub>, NO, SO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> y partículas menores de 10 micrones (PM<sub>10</sub>) (INSIVUMEH, 2011). El Boletín No. 210 para el 31 de Julio 2013 del INSIVUMEH sobre los Índices de Calidad del Aire para cada una de sus estaciones, indica que la calidad del aire en dichos puntos es buena o satisfactoria (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH], 2011).

El Centro del Agua del Trópico Húmedo para América Latina y el Caribe (CATHALAC), en el contexto del proyecto del Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica (SERVIR), implementado con USAID y NASA, desarrolló un análisis de calidad del aire y de acuerdo a los datos de pronósticos del modelo Community Multiscale Air Quality (CMAQ), estimó considerables concentraciones de ozono a nivel de la tropósfera y material particulado, localizado principalmente en las Costas del Pacífico de Guatemala y El Salvador. De acuerdo a la información del Fire Information for Resource Management System (FIRMS) de la Universidad de Maryland, se pueden observar varios puntos de calor localizados principalmente en las costas del Pacífico de Guatemala (Anexo II) (Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica [SERVIR], 2011).

### 3.11 ZONA DE ESTUDIO

Se trabajó en el corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur (HN-HS), el cual es un complejo urbano que recorre la ciudad de norte a sur. En dicho complejo están presentes varios tipos de uso del suelo, tales como: vivienda, comercio, recreación y el basurero municipal. Además, en esta área de muestreo se encuentran ubicados algunos de los parques urbanos con los que cuenta la ciudad capital (Parque Central, Parque Morazán, Parque San Sebastián, Parque Isabel la Católica, Cerrito del Carmen, Parque Concordia y Parque de la Industria) y el Jardín Botánico Universitario, los que a su vez están conectados a través de algunas de las vías de comunicación más concurridas del área metropolitana (Anexo I, Tabla 1).

La actual región metropolitana de Guatemala alberga el más importante centro industrial y de servicios del país y el crecimiento poblacional es del 3% anual. En el departamento de Guatemala actualmente habitan 3.42 millones de personas y se estima que para el 2020 serán 4.24 millones, de los cuales el 11% habitará en el área metropolitana (Municipalidad de Guatemala [MUNIGUATE], 2011).

La ciudad de Guatemala posee un clima agradable por las condiciones de temperatura y humedad. La humedad relativa oscila entre 65-86%, ocurriendo los porcentajes más bajos en la época seca de noviembre a abril y los más altos en la época de lluvia. De acuerdo al Sistema Thornwaite, en el municipio de Guatemala el clima es semicálido húmedo con invierno benigno seco. Según el Sistema de Clasificación de zonas de vida de Holdridge, en el municipio de Guatemala predomina el bosque húmedo subtropical templado (FUNDAECO, 2005, 15).

**Tabla 1.** Descripción de los puntos de muestreo, indicando código y coordenadas.

Punto	Código	Lugar	Latitud	Longitud	Descripción
Punto 1	P1	Jardín Botánico	14°36'52.00"N	90°30'49.55"O	Arriate: Avenida principal afuera del Jardín
Punto 2	P2	Estadio Mateo Flores	14°37'20.88"N	90°30'42.64"O	Arriate: Avenida principal afuera del Estadio
Punto 3	P3	Avenida Reforma	14°36'33.45"N	90°30'54.90"O	Arriate: Sobre avenida Reforma
Punto 4	P4	Parque Central	14°38'32.22"N	90°30'49.30"O	Parque: Dentro del Parque Central
Punto 5	P5	INCA	14°38'53.25"N	90°31'00.77"O	Arriate: Calle lateral al Instituto
Punto 6	P6	Parque Morazán	14°39'01.88"N	90°30'47.36"O	Parque: Dentro del Parque Morazán
Punto 7	P7	Parque San Sebastián	14°38'46.702"N	90°30'46.86"O	Parque: Dentro del Parque San Sebastián
Punto 8	P8	Parque Isabel la Católica	14°38'51.29"N	90°30'37.27"O	Parque: Dentro del Parque Isabel la Católica
Punto 9	P9	Cerrito del Carmen	14°38'52.86"N	90°30'15.06"O	Parque: Dentro del Parque
Punto 10	P10	Avenida Independencia 1	14°39'06.80"N	90°30'24.36"O	Residencial: Avenida principal "Av. Independencia" próxima a calle Martí
Punto 11	P11	Avenida Independencia 2	14°39'39.13"N	90°30'10.44"O	Residencial: Avenida principal "Av. Independencia" lejana a calle Martí
Punto 12	P12	Simeón Cañas	14°39'21.30"N	90°30'40.49"O	Residencial: Avenida principal área residencial
Punto 13	P13	Parroquia Santa Marta	14°37'37.84"N	90°31'32.85"O	Residencial: Avenida principal área residencial próxima al basurero municipal
Punto 14	P14	Avenida Bolívar y 33 Calle	14°37'07.67"N	90°31'41.63"O	Arriate: Avenida principal
Punto 15	P15	Parque Concordia	14°38'02.58"N	90°30'54.63"O	Parque: Dentro del Parque Concordia
Punto 16	P16	28 calle y 2da avenida, zona 3	14°37'27.05"N	90°31'33.05"O	Residencial: Avenida principal área residencial próxima a Cementerio General
Punto 17	P17	Trébol	14°36'54.49"N	90°32'07.47"O	Arriate: Avenida principal
Punto 18	P18	Parque de La Industria	14°36'34.01"N	90°31'33.49"O	Arriate: Avenida principal fuera del parque
Punto 19	P19	Obelisco	14°35'39.36"N	90°31'02.81"O	Arriate: Avenida principal
Punto 20	P20	Avenida Las Américas 1	14°35'17.74"N	90°31'13.30"O	Comercio: Avenida principal área comercial
Punto 21	P21	Avenida Las Américas 2	14°34'45.97"N	90°31'21.54"O	Comercio: Avenida principal área comercial
Punto 22	P22	Colonia Aurora 18 calle y 5ta avenida	14°34'40.13"N	90°31'11.13"O	Residencial: Área residencial
Punto 23	P23	Colonia Aurora 16 calle y 3ra avenida	14°34'52.03"N	90°31'14.85"O	Residencial: Área residencial
Punto 24	P24	20 calle y 9a avenida, zona 10	14°35'25.50"N	90°30'40.13"O	Comercio: Avenida principal área comercial
Punto 25	P25	Colonia Oakland	14°35'42.06"N	90°30'04.40"O	Residencial: Dentro de la colonia "Oakland"
Punto 26	P26	Plazuela España	14°36'04.59"N	90°31'05.36"O	Arriate: Avenida principal
Punto 27	P27	6 avenida y 6 calle de la zona 10	14°36'32.84"N	90°30'36.95"O	Comercio: Avenida principal área comercial
Punto 28	P28	Entrada a la Marroquín	14°36'26.28"N	90°30'29.70"O	Arriate: Entrada a Universidad Francisco Marroquín
Punto 29	P29	Zona 5 Burguer King	14°37'21.21"N	90°30'06.49"O	Arriate: Avenida principal área residencial
Punto 30	P30	Teatro Nacional	14°37'33.02"N	90°31'06.42"O	Parque: En el parqueo del Teatro Nacional
Punto 31	P31	Boulevard Liberación	14°35'59.04"N	90°31'27.55"O	Arriate: Avenida principal
Punto 32	P32	Zoo la Aurora	14°36'04.72"N	90°31'39.93"O	Parque: Dentro del Zoológico, área cercana al aeropuerto

#### 4. JUSTIFICACIÓN

El incremento en las emisiones de sustancias tóxicas a la atmósfera conlleva a un empeoramiento paulatino de la calidad del aire, por lo que es necesario un sistema de control que permita proteger el medio ambiente y por lo tanto, nuestra salud. El número de estudios en los cuales se analiza la calidad del aire utilizando parámetros biológicos en los que se observa cómo algunos seres vivos reaccionan ante la contaminación del aire es escaso.

La ciudad de Guatemala presenta una alta concentración de personas, es de gran movimiento y actividad, lo cual hace que los niveles de contaminación sean altos, siendo los contaminantes más comunes el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono, partículas en suspensión, metales pesados y compuestos químicos orgánicos (FUNDAECO, 2005, 4). El crecimiento del parque vehicular a nivel nacional ha sido del 7 al 15% en los últimos años, lo que ha incrementado la movilización vehicular en el área metropolitana. Se estima que de los 1.2 millones de vehículos en el país, 770,000 circulan en la región metropolitana (FUNDAECO, 2005, 50). Para el año 2010 el transporte automotor terrestre ascendió a 2,064,035 vehículos registrados a nivel nacional (Álvarez, 2012, 4). Asimismo, la rápida urbanización, la falta de ordenamiento y planificación han generado un alarmante deterioro del ambiente, como lo es la contaminación del aire y la pérdida de biodiversidad. Casi un 50% de la población del planeta vive en ciudades y se espera que para el año 2030 un 60% de los seres humanos viva en áreas urbanas (FUNDAECO, 2005a, 4).

Aunque las mediciones de contaminantes por métodos físico-químicos son importantes, no permiten obtener conclusiones sobre los efectos que las concentraciones de contaminantes tienen sobre los seres vivos. Por tal razón, el uso de bioindicadores para medir los efectos de la contaminación atmosférica es el pilar principal en la gestión de la calidad del aire en todo el mundo, ya que se utilizan organismos vivos para estimar el riesgo de la contaminación ambiental para los ecosistemas y la salud humana (Anze et al, 2007, 54).

El biomonitoreo utilizando líquenes permite trazar un mapa sobre la deposición de contaminación, a un tiempo relativamente corto y con bajos costos; también permite determinar tendencias espaciales y temporales (Santoni y Lijteroff; 2006, 50). Además los líquenes pueden recolonizar áreas urbanas e industriales en pocos años, luego que las

condiciones del medio han mejorado (VDI 3957, 2004, 5). El adecuado uso de comunidades líquénicas para la evaluación de la calidad del aire, permite realizar primeras aproximaciones al problema de la contaminación en áreas naturales dentro de zonas urbanas, no exploradas anteriormente (Santoni y Lijteroff; 2006, 51).

El método de IPA (índice de pureza atmosférica) ha mostrado con anterioridad una correlación alta entre los datos de emisión de varios contaminantes y la suma de las frecuencias de las especies encontradas. Existe, por lo general, una buena correlación entre la diversidad de los líquenes y la concentración de contaminantes, principalmente  $\text{SO}_2$  y  $\text{CO}_2$  (Rubiano y Chaparro, 2006, 89). En base a lo anterior, el presente trabajo es de gran importancia, ya que aporta información relativa al impacto que tiene la contaminación aérea en distintos puntos verdes de la ciudad, así como avenidas transitadas, áreas comerciales y áreas residenciales, lo cual es una base para la toma de decisiones en cuanto a la calidad del aire en la Ciudad de Guatemala.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 General.**

Categorizar los niveles de contaminación aérea en el corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur, en la ciudad de Guatemala, utilizando líquenes como indicadores.

### **5.2 Específicos.**

5.2.1 Determinar los líquenes epífitos presentes en el corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur.

5.2.2 Establecer patrones de contaminación aérea por medio del Índice de Pureza Atmosférica (IPA), IPA utilizando coberturas, Factor de Clasificación Ambiental (ECF) y composición de especies.

5.2.3 Identificar especies liquénicas que puedan utilizarse como indicadores biológicos de contaminación aérea.

## 6. HIPOTESIS

La composición<sup>1</sup> de líquenes epífitos permite categorizar los niveles de contaminación aérea en el corredor metropolitano Hipódromo del Norte-Hipódromo del Sur, en la Ciudad de Guatemala.

---

<sup>1</sup> Se refiere a cómo está compuesta la población de líquenes, o sea a la presencia o ausencia de las especies.

## 7. MATERIALES Y MÉTODOS

### 7.1 DISEÑO

- Población: la población estudiada comprende todas las especies de líquenes presentes en los 32 puntos de muestreo ubicados a lo largo del corredor metropolitano HN-HS.
- Tratamientos y unidades experimentales: se tomaron 32 puntos de muestreo a lo largo del área seleccionada en la ciudad capital, con un área de 0.5 km<sup>2</sup> cada uno (VDI 3957, 2004, 8) (Anexo 1, tabla 1). Dicha área se seleccionó debido a que posee varios tipos de uso del suelo, tales como parques municipales, vivienda, comercio, recreación y el basurero municipal, lo que permitió realizar una comparación de riqueza liquénica entre puntos cercanos entre sí, evaluando solamente el efecto de la contaminación aérea. Se tomaron muestras de 4 árboles (unidades experimentales) de *Jacaranda mimosifolia* D. Don., en cada uno de los 32 puntos de muestreo, con un total de 128 árboles analizados. En cada árbol se tomaron 10 muestras de 10x10 cm, con un total de 1280 muestras.

**Tabla 2.** Cantidad de árboles por área de muestreo

Unidad de muestreo	0.25 x 0.25 km	0.5 x 0.5 km	1 x 1 km	< 1 x 1 km
No. de árboles	3-4	4-6	6-12	8-16

(VDI 3957, 2004, 8)

- Variables: Las variables dependientes son la riqueza, abundancia<sup>2</sup> y cobertura de las especies encontradas. Las variables independientes son los puntos de muestreo elegidos y la especie de árbol muestreada

<sup>2</sup> Se refiere a cuántos organismos están presentes en cada población de líquenes, o sea el número de especímenes muestreados en cada árbol.

## 7.2 FASE DE CAMPO

Para obtener datos del Índice de Pureza Atmosférica (IPA) se utilizó un acetato de 50 cm de largo x 20 cm de ancho dividido en 10 cuadros de 10x10 cm, el cual se colocó verticalmente con el borde inferior a 100 cm del suelo, en el área del árbol más propensa a recibir emisiones y se dibujó la silueta de cada especie con un marcador, para medir la cobertura de cada especie de líquen en cada árbol. Luego, de cada cuadro de 10x10cm se tomaron todas las especies de líquenes presentes. (VDI 3957, 2004, 11).

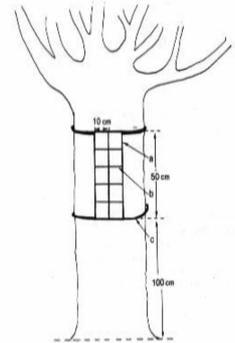


Figura 32  
Esquematación  
del muestreo

Con el fin de que el único factor ecológico variable entre las diversas estaciones de muestreo fuera la contaminación atmosférica, los puntos de muestreo se ubicaron en zonas donde no hay áreas verdes naturales, como barrancos, para evitar muestreos en microambientes distintos.

### 7.2.1. Técnica de colecta

*Selección del árbol a muestrear:*

Se seleccionaron árboles que poseían una circunferencia no menor de 70 cm ni mayor de 280 cm a la altura de 1.5 m y recibían radiación solar directa por lo menos durante una parte del día. No se utilizaron árboles dañados; la inclinación no fue mayor de 10° desde la vertical (VDI 3957, 2004, 9).

*Selección del material por recolectar:*

La recolección de ejemplares liquénicos se puede realizar durante cualquier época del año, pero se atendieron las siguientes consideraciones antes de remover cada espécimen del sustrato:

- Se recolectó únicamente el material necesario, estimando cuantitativamente la población liquénica para evitar depredar la zona.
- Se tomó en cuenta que el tamaño del ejemplar fuera el adecuado para depositarse en la colección de referencia, teniendo en cuenta la cantidad de material liquénico que sería aprovechado para la determinación taxonómica y luego desechado.

- Se anotó el aspecto y coloración del talo, ya que suelen ser indicadores de la vitalidad del ejemplar. Se evitó coleccionar material deteriorado.
- Se evaluó la posibilidad de remover cada ejemplar sin causarle daño, ya sea trasladando o no, parte del sustrato. Los líquenes con forma de roseta fueron recolectados íntegramente.
- Se determinó con ayuda de una lupa si el ejemplar presentaba las estructuras maduras necesarias para su determinación taxonómica.
- Cuando se encontraron ejemplares valiosos desecados y por lo tanto frágiles, se humedecieron para evitar su daño durante el proceso de remoción.
- Se tomaron fotografías en los puntos de colecta (Coutiño, 1986, 65-73).

#### *Técnicas de recolección y datos de campo:*

- Se anotó en la libreta de campo el número de recolección de cada ejemplar.
- Se apuntaron las coordenadas, altitud y fecha.
- Con una navaja se desprendieron de la corteza los ejemplares de líquenes.
- En una bolsa de papel kraft debidamente identificada, se depositó cada uno de los ejemplares recolectados.
- En una caja plástica se transportó el material recolectado al laboratorio para su análisis (Coutiño, 1986, 65-73).

### **7.3 FASE DE LABORATORIO**

Las muestras obtenidas durante el muestreo fueron identificadas en el Herbario USCG mediante la utilización de claves taxonómicas. Para dicho fin se describieron las características macro y microscópicas de cada líquen. Además se realizaron pruebas punto en la corteza y la

médula de los ejemplares colectados, cuando fue necesario para identificar las especies. Dicha prueba consiste en aplicar una gota de reactivo (KOH, Cl, KC, P, I y luz UV) en diferentes partes del talo y observar si hay alguna reacción y el color que presenta.

*Preservación del material:*

En el sitio mismo de la recolección, se procuró eliminar del ejemplar cualquier exceso de material no líquénico, para facilitar su herborización. Los líquenes se pusieron al aire libre para eliminar el exceso de humedad, luego se pegaron en fichas de cartulina y se almacenaron en sobres hechos con hojas de papel bond. Las hojas se doblan en tres partes iguales a lo ancho, las dos primeras contendrán el material y la externa porta la etiqueta del herbario. Ambos extremos del sobre se doblan hacia atrás para no cubrir la etiqueta. Posteriormente se elaboraron las etiquetas, en éstas se anotó el nombre del herbario, género, especie y autoridades, coordenadas, altitud, nombre del recolector, número de recolección, fecha de colecta, nombre de la persona que lo determinó y fecha, y una pequeña descripción taxonómica.

*Identificación de los especímenes colectados:*

Las muestras obtenidas durante el muestreo fueron identificadas mediante la utilización de diferentes claves taxonómicas propuestas por una variedad de autores, dentro de los cuales se incluye a Sipman (2005a, b, c y d) con claves para líquenes del Neotrópico, obtenidas vía internet, en donde se cubren cerca de 300 géneros. Se emplearon las claves de Lücking, Chaves, Sipman, Umaña y Aptroot, (2008) para la familia Graphidaceae; las de Brodo (2001) para Norte América; las de Aptroot, Lücking, Sipman, Umaña y Chaves (2008) para líquenes pirenocarpos, entre otros. Para dicho fin se describieron las características macro y microscópicas de los líquenes, las que se anotaron en una ficha técnica. Las muestras fueron herborizadas y serán depositadas en la sección de hongos, del Herbario BIGU de la Escuela de Biología de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para su preservación y posteriores estudios.

## 7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La riqueza de especies fue considerada como el número total de especies de líquenes encontradas en los 4 árboles analizados en cada punto de muestreo.

### 7.4.1 Diversidad

Un índice de diversidad es una medida cuantitativa que refleja cuantas especies diferentes hay en una base de datos, y así mismo, toma en cuenta cómo se distribuyen los individuos. El valor del índice de diversidad se ve maximizado cuando todas las especies son igualmente abundantes. La diversidad verdadera, o número efectivo de especies, se refiere al número de especies igualmente abundantes que se necesitan para obtener la abundancia proporcional promedio de especies que sea equivalente a la observada en el conjunto de datos. Esta es una forma más fácil de interpretar los resultados, más confiable e informativa.

**Tabla 3.** Fórmulas para cálculo de diversidad

Índice de diversidad	Conversión para diversidad verdadera
Riqueza $X = \sum P_i$	$q_0 = \sum P_i$
Shannon $X = \sum P_i \ln P_i$	$q_1 = e^{\sum P_i \ln P_i}$
Gini-Simpon $X = 1 - \sum P_i^2$	$q_2 = 1 / \sum P_i^2$

(Jost, 2006, 2)

Los índices de diversidad se calcularon en base a las coberturas de cada especie en cada sitio, utilizando el  $q_1$  o índice de Shannon modificado, el cual tiene la ventaja que se puede dividir en valores de alpha y beta independientes y además, se basa en frecuencias, sin favorecer especies raras o comunes.

### 7.4.2 Índice de Pureza Atmosférica

Para calcular el IPA de cada estación se suman las frecuencias de todas las especies en cada árbol y se divide entre el número de árboles muestreados en dicho punto de muestreo. Este método permite delimitar áreas con diferente calidad de aire. Provee información sobre el efecto a largo plazo de los contaminantes, la eutrofización, y otros factores antropogénicos en organismos sensibles (VDI 3957, 2004, 12). Este método de frecuencia permite predecir los

niveles de contaminación por sobre un 97% (Szczepaniak y Biziuk, 2003, 227). Para la representación cartográfica de los resultados se utilizó el programa ArcGis.

Se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$IPA = \sum_1^n \frac{(Q * f)}{10}$$

En donde: n= número de especies

Q= factor de sensibilidad (ver fórmula siguiente)

f= frecuencia de cada especie

y

$$Qi = \sum \frac{Aj - 1}{Ej}$$

En donde:

Qi: Factor de sensibilidad de la especie i

Aj: Número de especies presentes en cada estación donde se encuentre i

Ej: Número de estaciones donde se halle i

#### 7.4.3 Índice IPA utilizando cobertura

El área en cm<sup>2</sup> de cada líquen en cada árbol se trabajó con ayuda del programa Autocad 2012, con el que se calculó el porcentaje de cobertura de cada especie. Para calcular el IPA utilizando coberturas, se utilizó una escala de frecuencia de 1 a 5, que varía de acuerdo al porcentaje de cobertura de las especies, de la siguiente forma:

1. Para un árbol con bajo porcentaje de cobertura (0-20%).
2. Para 2 árboles con bajo porcentaje de cobertura (0-20%).
3. Para 2-3 árboles con mediano nivel de cobertura (0-40%).

4. Para 2-3 árboles con alto porcentaje de cobertura (40-80%).
5. Para 3-4 árboles con mayor porcentaje de cobertura (80-100%).

#### 7.4.4 Índice Factor de Clasificación Ambiental (ECF)

El ECF propuesto por Kaffer 2011, incorpora parámetros del IPA como un factor de corrección a través de una escala de porcentajes de cobertura de cada forma de crecimiento de los líquenes encontrados (costrosos y foliosos), se calcula de la siguiente manera:

$$ECF = (CMGc + CMGfo + CMGfr) * \frac{IPA}{100}$$

En donde: CMGc= Escala de cobertura para especies costrosas, CMGfo= Escala de cobertura para especies foliosas, CMGfr= Escala de cobertura para especies fruticasas, IPA= Índice de Pureza Atmosférica

**Tabla 4.** Sistema de ordenamiento para obtener la escala utilizada en el ECF.

Escala de cobertura para especies costrosas (CMGc)		Escala de cobertura para especies foliosas (CMGfo)		Escala de cobertura para especies fruticasas (CMGfr)	
% Cobertura	Escala	% Cobertura	Escala	% Cobertura	Escala
0-20	9	0-20	10	Ausente	1
20.1-40	7	20.1-40	8	0.1-1.5	5
40.1-60	5	40.1-60	6	1.6-3.0	7
60.1-80	3	60.1-80	4	3.1-4.5	10
80.1-100	1	80.1-100	2	4.6 o más	15

(Käffer, 2011)

Posteriormente los datos obtenidos de los índices se clasificaron en las categorías establecidas por Le Blanc y De Sloover en 1970, en donde: Clase I-Liquen ausente, con valores de IPA de 1.0-5.5, Clase II-Liquen pobre (5.6-15.5), Clase III-Área de Transición (15.6-35.5), Clase IV-Normal (35.6-75.5) y Clase V-Excelente (arriba de 75.6).

#### **7.4.5 Análisis de la comunidad**

Para determinar los patrones en las comunidades liquénicas presentes en los diferentes puntos de muestreo se utilizó un análisis de agrupamiento jerárquico, el cual permite la representación gráfica de las relaciones entre los objetos de un conjunto de datos. Estas relaciones están dadas por la similitud que existe entre los objetos y los grupos. Las especies tienden a agruparse de acuerdo a la abundancia en vez de agruparse por similitudes en su tolerancia ecológica. Además se utilizó un análisis exploratorio de Escalamiento Multidimensional No Métrico (NMDS), que es una técnica multivariante de interdependencia que trata de representar en un espacio geométrico de pocas dimensiones las proximidades existentes entre un conjunto de objetos. Los datos se analizaron en el programa R utilizando el paquete VEGAN. Ambos análisis se utilizaron para evaluar qué tan iguales son los puntos entre sí y se obtuvieron gráficos que permiten visualizar la composición de la comunidad liquénica (McCune y Grace, 2002; Jongman, Braak y Tongeren, 1995, 91-95).

#### **7.4.6 Análisis de especies indicadoras**

El Índice Ecológico (Q) representa la tolerancia o sensibilidad de una especie ante la contaminación aérea, para un bajo Q las especies muestran alta tolerancia y para un alto Q es baja tolerancia. Está definido por el número de especies acompañantes de la especie indicadora (Kricke y Loppi, 2002, 2).

## 8. RESULTADOS

Se muestrearon 32 puntos en total, de los cuales 12 son arriates, 8 parques, 8 áreas residenciales y 4 áreas comerciales, en donde se obtuvieron los siguientes resultados:

### 8.1 Riqueza y Diversidad

Se identificaron 65 especies divididas en 23 géneros y 16 familias, de las cuales 26 especies son nuevos registros para el país. De las 37 especies que ya habían sido reportadas para el país, 5 no habían sido reportadas para la ciudad de Guatemala (Tabla 5). La morfoespecie *Chroodiscus* sp. no fue posible identificarla hasta especie debido a la escasez de claves de dicho género, el cual solamente ha sido reportado para el departamento de Petén.

En cuanto a grupos morfológicos, el 49% corresponde a especies costrosas y el 51% pertenece a especies foliosas.

La familia Physciaceae representa el mayor número de especies (20%), seguida por las familias Graphidaceae (13.5%), Caliciaceae (9.2%) y Collemataceae (9.2%). El género con mayor cantidad de especies es *Graphis* (13.9%), seguido por *Leptogium* (9.2%) y *Physcia* (9.2%)

La especie más frecuente fue *Candelaria concolor* (Dicks.) Arnold, presente en 27 de los 32 puntos de muestreo, seguida por *Hyperphyscia adglutinata* (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt, presente en 24 puntos (Tabla 5).

De los puntos de muestreo el que presentó mayor número de especies fue el P28 con 28 especies, seguido por el P21 con 26 especies. El P8 fue el que presentó menor cantidad de especies, con solamente 4, seguido por el P14 con solamente 5 especies.

Se obtuvieron los valores de diversidad  $\alpha_1=14.46$  y diversidad  $\beta_1=13.38$  con un índice de similitud de Shannon de 53.48, lo que indica que son 14 especies efectivas, en donde el 47% de los puntos son diferentes en cuanto a composición de especies, presentando un bajo recambio de especies entre los sitios.



... continuación de Tabla 5. Líquenes presentes en cada punto de muestreo en la Ciudad de Guatemala, las x representan presencia, talo co indica costrosos y fo foliosos, (\*) nuevos reportes para el país, (\*\*) especies nuevas para Guatemala reportadas en el estudio de Lüicking et al, 2011 y (\*\*\*) nuevos reportes para la ciudad.

Especie	Familia	Talo	Puntos de muestreo																															
			P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20	P21	P22	P23	P24	P25	P26	P27	P28	P29	P30	P31	P32
<i>Leptogium austroamericanum</i> (Malme) C.W. Dodge***	Collemataceae	Fo					X	X				X				X							X	X	X	X			X	X	X			
<i>Leptogium azureum</i> (Sw. ex Ach.) Mont.*	Collemataceae	Fo																															X	
<i>Leptogium chloromelum</i> (Ach.) Nyl.	Collemataceae	Fo	X				X						X				X	X				X		X						X		X	X	
<i>Leptogium marginellum</i> (Sw.) Gray	Collemataceae	Fo									X																							X
<i>Leptogium milligranum</i> Sierk	Collemataceae	Fo																					X	X										X
<i>Leptogium phyllocarpum</i> (Pers.) Mont.	Collemataceae	Fo				X	X				X	X										X	X	X	X	X		X	X	X		X		
<i>Mycomicrothelia subfallens</i> (Müll. Arg.) D. Hawksw.*	Arthopyreniaceae	Co																	X															
<i>Parmotrema crinitum</i> (Ach.) M. Choisy***	Parmeliaceae	Fo														X																		
<i>Parmotrema dilatatum</i> (Vain.) Hale*	Parmeliaceae	Fo					X																											
<i>Parmotrema mellissii</i> (C.W. Dodge) Hale	Parmeliaceae	Fo																				X												
<i>Physcia aipolia</i> (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr.***	Physciaceae	Fo	X	X			X	X		X	X	X	X	X		X						X	X		X	X		X		X	X	X	X	X
<i>Physcia americana</i> G. Merr.*	Physciaceae	Fo									X																							
<i>Physcia caesia</i> (Hoffm.) Hampe ex Fűrnr.*	Physciaceae	Fo					X																											
<i>Physcia millegrana</i> Degel.*	Physciaceae	Fo	X				X			X	X	X				X	X							X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Physcia solediosa</i> (Vain.) Lyngé	Physciaceae	Fo	X						X	X	X	X						X				X	X	X	X	X				X				
<i>Physcia stellaris</i> (L.) Nyl.	Physciaceae	Fo	X	X		X	X	X	X													X	X		X	X				X				
<i>Pyrenula confinis</i> (Nyl.) R.C. Harris**	Pyrenulaceae	Co			X		X					X			X				X		X	X	X		X	X		X	X			X		
<i>Pyrenula punctella</i> (Nyl.) Trevis.*	Pyrenulaceae	Co					X	X				X			X				X	X	X	X		X	X		X	X		X	X		X	
<i>Pyxine berteriana</i> (Fée) Imshaug***	Caliciaceae	Fo	X	X	X		X	X																										X
<i>Pyxine caesiopruinosa</i> (Tuck.) Imshaug**	Caliciaceae	Fo					X				X	X			X	X												X		X				
<i>Pyxine cocoës</i> (Sw.) Nyl.	Caliciaceae	Fo				X	X	X		X	X				X		X	X	X												X		X	
<i>Pyxine petricola</i> Nyl.	Caliciaceae	Fo		X							X	X	X	X		X															X	X		
<i>Soralia verde</i>		Co	X		X	X					X						X	X								X	X		X					X
<i>Xanthoria candelaria</i> (L.) Th. Fr.	Teloschistaceae	Fo					X	X	X		X				X			X				X						X	X				X	

En cuanto a la cobertura, el área total muestreada fue de 4,000 cm<sup>2</sup> en cada punto de muestreo. Se observó que el P6 (2,565.5) y el P7 (2,501.3) presentaron los mayores valores, mientras que el punto P13 (334.5) y el P18 (343.3) obtuvieron los menores valores. La especie con la mayor cobertura fue *Hyperphyscia adglutinata* (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt (10,107.2 cm<sup>2</sup>) y la de menor cobertura fue *Arthonia complanata* Fée. (0.4 cm<sup>2</sup>) El mayor porcentaje de líquenes foliosos se registró en el P7 (58.6%), y para los líquenes costrosos fue el P28 (10.2) (Tabla 6).

### 8.2 Índice de Pureza Atmosférica y Factor de Clasificación ambiental

Los valores de IPA oscilan entre 4.5 y 25.5, teniendo un 6.25% de clase I, 68.75% de clase II y 25% de clase III (Figura 33). Los valores de IPA utilizando cobertura oscilan entre 11.1 y 75.4, teniendo un 12.5% de clase II, 53.13% de clase III y 34.37% de clase IV (Figura 34). Ambos índices (IPA e IPA+Cob) coinciden en que los valores más bajos se encuentran en el punto P5 y el punto P8, y los más altos se encuentran en el punto P28 y el punto P21 (Tabla 7). Los valores del ECF oscilan entre 1.7 y 15.1, teniendo un 56.25% de clase I y 43.75% de clase II (Figura 35).

### 8.3 Patrones de la comunidad liquénica a lo largo del cinturón Metropolitano HN-HS

En el dendrograma se pueden distinguir 2 grupos principales, en el primero (azul) se agrupan los puntos P8, P5 y P14. En el segundo grupo (verde) se puede observar un pequeño subgrupo (rojo) que agrupa a los puntos P28, P21 y P23. Esto coincide con las clases agrupadas por medio de los índices utilizados (Figura 36).

El análisis de ordenación (NMDS) presentó un stress de 0.2, observándose el mismo patrón resultante del análisis de agrupamiento (Figura 37) en donde dos grandes grupos se traslapan, en el área marcada de celeste se encuentran los puntos con menores valores de IPA y el área en rosado indica los dos puntos con mayores valores de IPA.

**Tabla 6.** Valores de riqueza, cobertura (cm<sup>2</sup>) y porcentaje de formas de crecimiento de un total de 4,000 cm<sup>2</sup> de área muestreada en cada punto.

<b>Lugar</b>	<b>Riqueza</b>	<b>SumCob</b>	<b>%Foliosos</b>	<b>%Costrosos</b>
<b>P1</b>	10	1897.85	47.2	0.2
<b>P2</b>	12	2066.263	45.1	6.6
<b>P3</b>	9	438.8022	9.4	1.6
<b>P4</b>	12	670.8155	7.2	9.6
<b>P5</b>	6	955.3084	14.2	9.7
<b>P6</b>	14	2565.484	55.2	9.0
<b>P7</b>	16	2501.274	58.6	4.0
<b>P8</b>	4	2100.782	50.7	1.8
<b>P9</b>	8	1406.198	35.2	0.0
<b>P10</b>	14	1468.499	36.5	0.2
<b>P11</b>	19	1310.374	32.1	0.7
<b>P12</b>	17	655.9761	14.1	2.3
<b>P13</b>	6	334.5101	8.4	0.0
<b>P14</b>	5	1456.363	36.4	0.0
<b>P15</b>	12	440.6074	9.0	2.0
<b>P16</b>	20	703.3332	16.1	1.5
<b>P17</b>	10	1281.058	31.5	0.5
<b>P18</b>	11	343.2683	6.2	2.4
<b>P19</b>	10	970.8858	23.3	1.0
<b>P20</b>	14	834.6639	17.7	3.2
<b>P21</b>	26	994.099	17.1	7.8
<b>P22</b>	15	942.8025	22.4	1.2
<b>P23</b>	17	2072.907	50.4	1.4
<b>P24</b>	14	1110.866	25.0	2.7
<b>P25</b>	19	940.4587	19.5	4.0
<b>P26</b>	7	503.021	10.0	2.6
<b>P27</b>	10	959.2107	23.6	0.4
<b>P28</b>	28	1023.265	15.4	10.2
<b>P29</b>	10	1086.626	27.2	0.0
<b>P30</b>	10	1525.875	36.1	2.1
<b>P31</b>	20	1766.248	41.3	2.9
<b>P32</b>	11	706.6387	16.2	1.4

Fuente: Datos Experimentales.

**Tabla 7.** Valores del índice de pureza atmosférica y del factor de clasificación ambiental en donde Clase I-Liquen ausente (1.0-5.5), Clase II- Liquen pobre (5.6-15.5), Clase III- Área de transición (15.6-35.5), Clase IV- Normal (35.6-75.5), Clase V- Excelente (más de 75.6).

<b>Lugar</b>	<b>IPA</b>	<b>Clase</b>	<b>IPA+Cob</b>	<b>Clase</b>	<b>ECF</b>	<b>Clase</b>
<b>P1</b>	12.7659	II	32.2246	III	5.8232	II
<b>P2</b>	13.7165	II	31.8043	III	4.2743	I
<b>P3</b>	12.6436	II	23.8657	III	6.7109	II
<b>P4</b>	12.8005	II	29.5009	III	4.6205	I
<b>P5</b>	4.5537	I	11.9557	II	5.0887	I
<b>P6</b>	15.6419	III	36.7317	IV	4.5567	I
<b>P7</b>	18.0622	III	37.1788	IV	7.2138	II
<b>P8</b>	6.0676	II	11.0774	II	5.1559	I
<b>P9</b>	9.0794	II	19.8041	III	5.8771	II
<b>P10</b>	14.4725	II	32.5244	III	11.0118	II
<b>P11</b>	15.6025	III	37.2828	IV	4.6381	I
<b>P12</b>	14.6374	II	36.0007	IV	6.6945	II
<b>P13</b>	5.2412	I	15.0901	II	5.9002	II
<b>P14</b>	7.4991	II	14.4958	II	4.7731	I
<b>P15</b>	6.7560	II	20.8856	III	5.9486	II
<b>P16</b>	20.4940	III	39.1996	IV	15.0769	II
<b>P17</b>	12.1174	II	26.9123	III	4.1771	I
<b>P18</b>	7.2472	II	23.1026	III	3.5647	I
<b>P19</b>	8.7974	II	23.7463	III	5.8544	II
<b>P20</b>	11.3675	II	29.1161	III	4.8442	I
<b>P21</b>	22.4998	III	55.0592	IV	7.6240	II
<b>P22</b>	12.2322	II	37.1918	IV	3.6995	I
<b>P23</b>	19.6988	III	53.7590	IV	4.6782	I
<b>P24</b>	12.0749	II	25.3151	III	7.2001	II
<b>P25</b>	11.4930	II	36.0691	IV	8.6014	II
<b>P26</b>	10.3850	II	18.4977	III	2.3911	I
<b>P27</b>	13.3669	II	25.7671	III	3.0180	I
<b>P28</b>	25.4563	III	75.3847	IV	5.4936	I
<b>P29</b>	9.6942	II	22.0105	III	1.7724	I
<b>P30</b>	9.9927	II	25.9898	III	2.6093	I
<b>P31</b>	19.8673	III	47.6503	IV	3.9619	I
<b>P32</b>	10.1295	II	27.4681	III	7.8399	II

Fuente: Datos Experimentales.

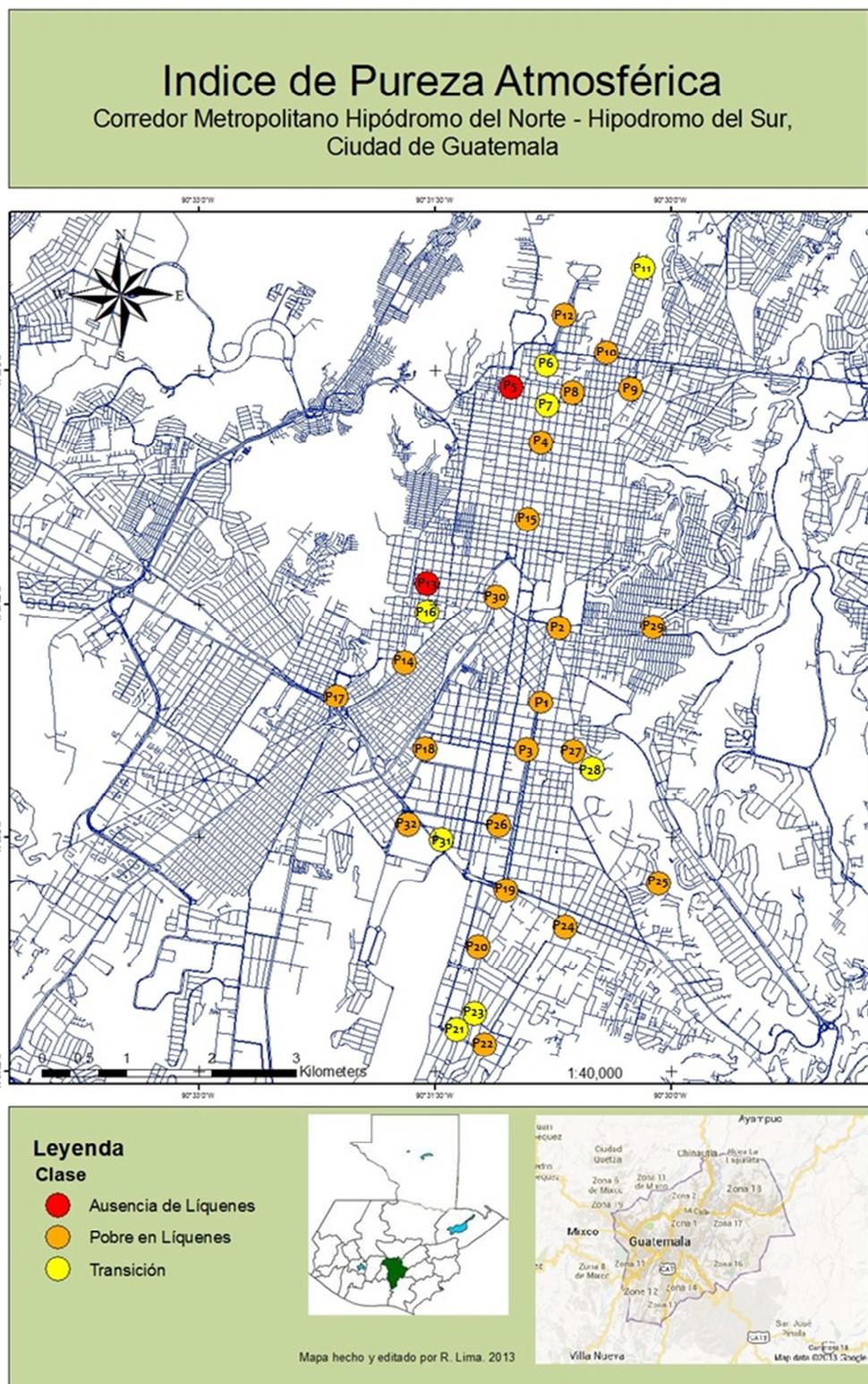


Figura 33. Mapa de la ciudad de Guatemala utilizando el índice IPA

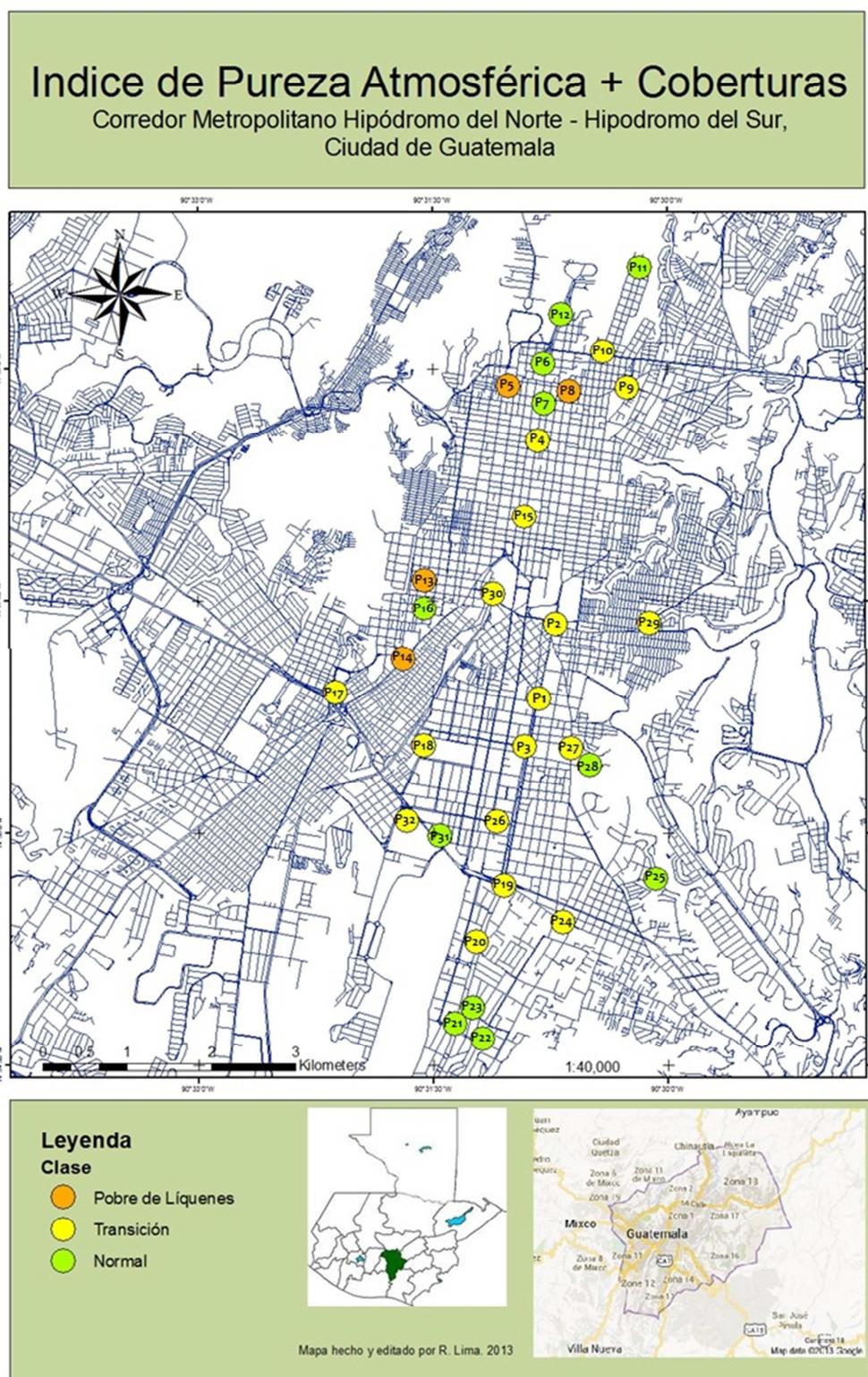


Figura 34. Mapa de la ciudad de Guatemala utilizando el índice IPA+Cobertura

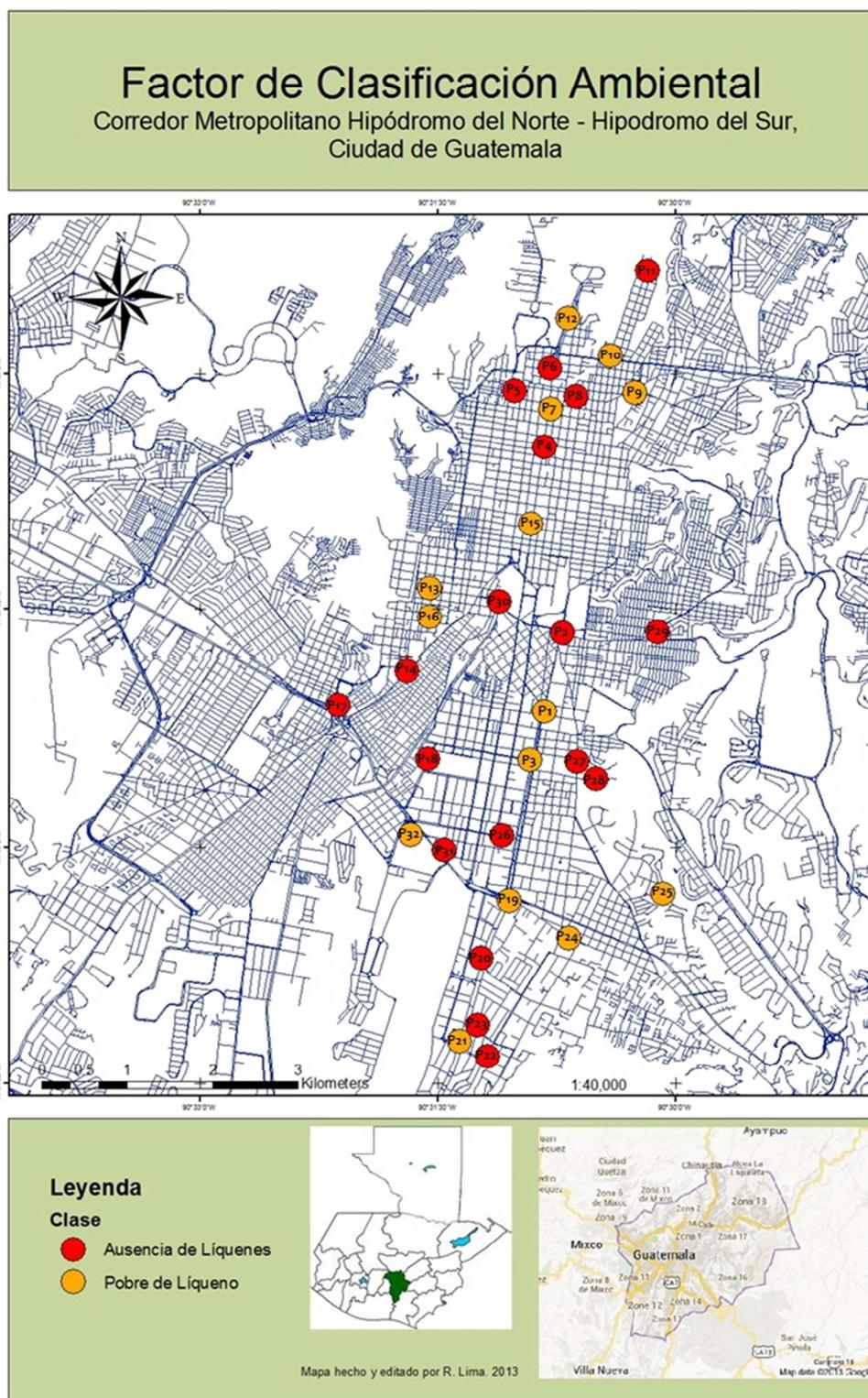
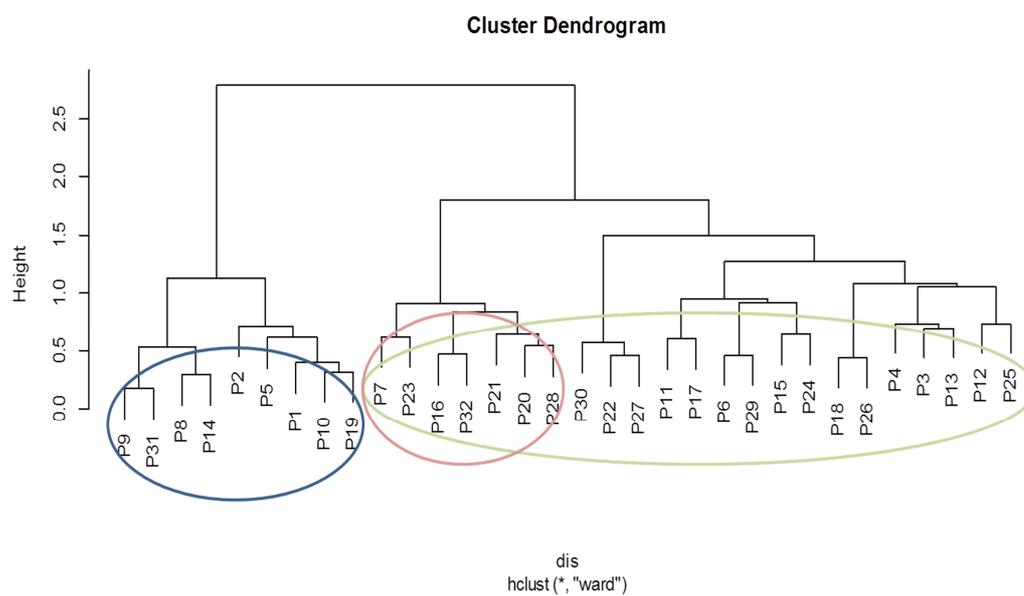
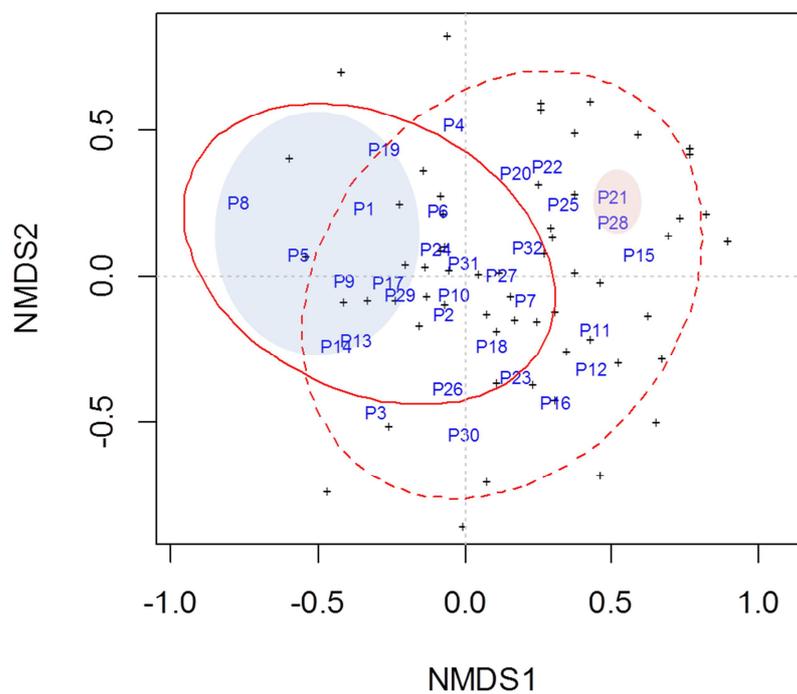


Figura 35. Mapa de la ciudad de Guatemala utilizando el índice ECF



**Figura 36.** Dendrograma de los 32 puntos de muestreo en base a la cobertura de cada especie.



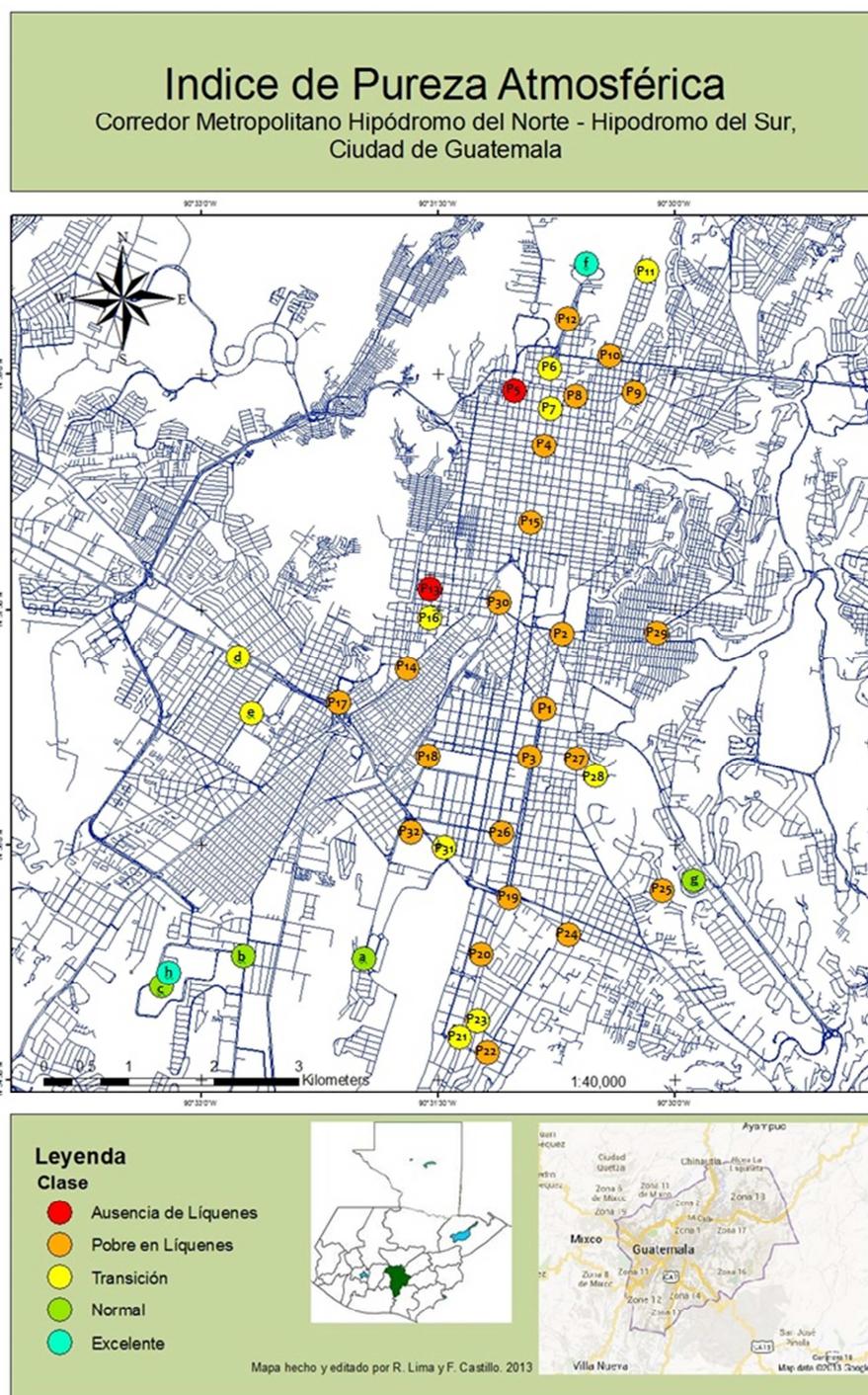
**Figura 37.** Modelo de ordenación del NMDS (stress de 0.2)

#### 8.4 Especies de líquenes como indicadoras de áreas urbanas

El Índice Ecológico Q indica que las especies foliosas toxitolerantes son *Hyperphyscia adglutinata* (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt, *Physcia stellaris* (L.) Nyl., *Physcia caesia* (Hoffm.) Hampe ex Fűrnr., *Leptogium azureum* (Sw. ex Ach.) Mont., *Candelaria concolor* (Dicks.) Arnold, *Leptogium milligranum* Sierk, *Pyxine cocoës* (Sw.) Nyl. Y *Physcia aipolia* (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr. entre otras. De las especies costrosas toxitolerantes, cuatro pertenecen al género *Graphis* y dos al género *Arthopyrenia*. Las especies foliosas *Parmotrema crinitum* (Ach.) M. Choisy y *Heterodermia granulifera* (Ach.) W.L. Culb. podrían ser consideradas como toxifóbicas o más sensibles a la contaminación urbana (tabla 8).

**Tabla 8.** Valores de Q para cada especie, en donde los valores bajos indican especies tolerantes y los altos especies sensibles, señalando las especies foliosas toxitolerantes.

Especie	Q	Especie	Q
<i>Graphis lineola</i> Ach.	3	<i>Graphis rimulosa</i> (Mont.) Trevis.	6
<i>Arthopyrenia planorbis</i> (Ach.) Müll. Arg.	4	<i>Pyxine berteriana</i> (Fée) Imshaug	6
Soralia verde	4	<i>Coccocarpia palmicola</i> (Spreng.) Arv. & D.J. Galloway	6
<i>Arthopyrenia cinchonae</i> (Ach.) Müll. Arg.	4	<i>Pyrenula confinis</i> (Nyl.) R.C. Harris	6
<i>Graphis chondroplaca</i> (Redinger) Lücking	4	<i>Pyrenula punctella</i> (Nyl.) Trevis.	7
<i>Graphis dracena</i> Vain.	4	<i>Arthonia patellulata</i> Nyl.	7
<i>Graphis submarginata</i> Lücking	4	<i>Caloplaca cerina</i> (Hedw.) Th. Fr.	7
<b>Leptogium azureum</b> (Sw. ex Ach.) Mont.	4	<i>Cryptothecia striata</i> G. Thor	7
<b>Physcia caesia</b> (Hoffm.) Hampe ex Fűrnr.	4	<i>Enterographa micrographa</i> (Nyl.) Redinger	7
<b>Physcia stellaris</b> (L.) Nyl.	4	<i>Graphis anfractuosa</i> (Eschw.) Eschw.	7
<b>Hyperphyscia adglutinata</b> (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt	4	<i>Lecanora strobilina</i> (Spreng.) Kieff.	7
<b>Candelaria concolor</b> (Dicks.) Arnold	5	<i>Physcia americana</i> G. Merr.	7
<b>Leptogium milligranum</b> Sierk	5	<i>Arthonia rubella</i> (Fée) Nyl.	7
<b>Pyxine cocoës</b> (Sw.) Nyl.	5	<i>Bacidia rosella</i> (Pers.) De Not.	8
<b>Physcia aipolia</b> (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr.	5	<i>Heterodermia diademata</i> (Taylor) D.D. Awasthi	8
<i>Graphis furcata</i> Fée	5	<i>Xanthoria candelaria</i> (L.) Th. Fr.	8
<i>Graphis librata</i> Fée	5	<i>Heterodermia albicans</i> (Pers.) Swinscow & Krog	8
<i>Mycocrothelia subfallens</i> (Müll. Arg.) D. Hawksw.	5	<i>Parmotrema mellissii</i> (C.W. Dodge) Hale	8
<b>Parmotrema dilatatum</b> (Vain.) Hale	5	<i>Candelaria fibrosa</i> (Fr.) Müll. Arg.	8
<b>Leptogium chloromelum</b> (Ach.) Nyl.	5	<i>Dirinaria picta</i> (Sw.) Schaer. ex Clem.	9
<b>Hyperphyscia pandani</b> (H. Magn.) Moberg	5	<i>Caloplaca pollinii</i> (A. Massal.) Jatta	9
<b>Leptogium austroamericanum</b> (Malme) C.W. Dodge	5	<i>Chroodiscus</i> sp	10
<b>Pyxine caesiopruinosa</b> (Tuck.) Imshaug	5	<i>Leptogium marginellum</i> (Sw.) Gray	10
<b>Dirinaria applanata</b> (Fée) D.D. Awasthi	5	<i>Bacidia schweinitzii</i> (Fr. ex Tuck.) A. Schneid.	11
<b>Pyxine petricola</b> Nyl.	5	<i>Arthonia caesia</i> H. Olivier	11
<i>Canoparmelia crozalsiana</i> (B. de Lesd.) Elix & Hale	6	<i>Arthonia complanata</i> Fée	11
<i>Physcia solediosa</i> (Vain.) Lyngé	6	<i>Lecanora thysanophora</i> R.C. Harris	11
<i>Hyperphyscia pyrithrocardia</i> (Müll. Arg.) Moberg & Aptroot	6	<i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.	12
<i>Hyperphyscia minor</i> (Fée) Kalb	6	<i>Heterodermia granulifera</i> (Ach.) W.L. Culb.	13
<i>Leptogium phyllocarpum</i> (Pers.) Mont.	6	<i>Parmotrema crinitum</i> (Ach.) M. Choisy	13
<i>Physcia millegrana</i> Degel.	6	<i>Graphis elegans</i> (Borrer ex Sm.) Ach.	15
<i>Caloplaca flavorubescens</i> (Huds.) J.R. Laundon	6	<i>Lecanora cupresii</i> Tuck.	16
<i>Coenogonium moniliforme</i> Tuck.	6		



**Figura 38.** Mapa de la ciudad de Guatemala utilizando la escala IPA, incluyendo los resultados de Lücking et al (2011), en donde: a)INSIVUMEH, b)EFPEM, c)USAC-T10, d)HINO, e)INCAP, f)Hipódromo del Norte, g) Colonia el Maestro, h)IGLU.

## 9. DISCUSION

### Riqueza

El presente estudio reporta 26 nuevos registros para el país (Tabla 5), lo que indica que el estudio de líquenes en Guatemala es bastante reciente y escaso, evidenciado en las escasas publicaciones y el reducido número de registros de colecta disponibles en los herbarios del país (AGUAT, BIGU, USCG y UVAL), en donde se han reportado poco más de 500 especies (Cohn, G. y Sunum, R. 2012. 80) de las 3,000 estimadas para la República de Guatemala (Lücking, R., Rivas, E., Chavez, J., Umaña, L. y Sipman, H. 2009). Se debe considerar, además, que en áreas urbanas las comunidades liquénicas no son tan diversas como en ambientes naturales y por lo general están compuestas de especies que toleran el exceso de luz y contaminantes aéreos.

Los líquenes foliosos se han reportado como los más sensibles a los factores atmosféricos (Hawskworth y Rose, 1970), sin embargo, la familia Physciaceae en el presente estudio es la más abundante y la especie *Hyperphyscia adglutinata* (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt de dicha familia, cubre la mayor superficie, indicando que esta especie tiene una alta capacidad para colonizar áreas adversas, lo que apoya su potencial como bioindicador de alta contaminación (Valor Q=4). Estos resultados coinciden con lo reportado por Estrabou (1998) quien propone dos especies de *Hyperphyscia* como bioindicadoras y Saipunkaew, Wolseley, Chimonides y Boonpragob (2004) que reportan a *H. adglutinata* como tolerante a la contaminación.

La segunda familia más abundante es Graphidaceae, compuesta de líquenes costrosos, los cuales son menos vulnerables a las alteraciones de la calidad del aire (Hawskworth y Rose, 1970), dado que presentan una unión más estrecha con el sustrato, tienen crecimiento marginal y no poseen corteza inferior. *Graphis* presenta una riqueza de 9 especies lo que coincide con otros estudios (Dixon y Kelly, 1979, Ederra, 1996; Das, 2013), en donde especies de este género han sido reportadas como tolerantes a la contaminación.

En cuanto a los valores de diversidad ( $\alpha_1=14.46$  y  $\beta_1=13.38$ ) se puede observar poca diferencia entre los puntos de muestreo, manifestando que la comunidad liquénica en el corredor es homogénea lo que puede explicarse por los altos índices de contaminación aérea en el corredor metropolitano HN-HS, y la poca diferencia en los valores de IPA para los diferentes puntos de muestreo. Fernández et al (2006) evaluaron un área de España 10 años

después de su primer muestreo con bioindicadores, y no encontraron grandes cambios en la composición líquénica a pesar que las emisiones de SO<sub>2</sub> aumentaron, sin embargo, observaron un aumento en la frecuencia de especies toxitolerantes, las cuales se ven favorecidas por el aumento de emisiones de contaminantes. Este panorama podría darse en la ciudad de Guatemala en un futuro si no se regulan y disminuyen las emisiones de contaminantes a la atmósfera.

### **Patrones de contaminación**

La presente investigación sigue una tendencia mundial en relación a investigaciones liquenológicas que permiten identificar y registrar tendencias con cambios en las comunidades líquénicas en áreas urbanas. Los valores de IPA reportados en el presente estudio (4.5 - 25.5) indican que la mayoría de puntos de muestreo (22) se encuentran dentro de la clasificación pobre en líquenes, seguidos por áreas de transición (8) y los puntos P5 y P13 con valores tan bajos que se encuentran dentro de la clase ausencia de líquenes (Figura 33). Por otro lado, el presente estudio propuso incluir al IPA valores de cobertura de las especies en cada punto de muestreo para visualizar las especies dominantes en las comunidades. Los valores obtenidos en esta variante del IPA (11.1- 75.4) indican que la mayoría de puntos (17) se encuentran en la clase transición, seguido por normal (11) y luego cuatro puntos pobres en líquenes (Figura 34). Los valores más bajos de IPA+cobertura corresponden a las áreas más contaminadas en donde se encuentran los puntos P5 y P13, los cuales coinciden con los valores de IPA, y a este grupo se añaden los puntos P8 y P14 debido a que la especie toxitolerante *H. adgluinata* es dominante por el grado de cobertura (1,936 y 1,241 cm<sup>2</sup>). Los puntos con mayor valor de IPA+cobertura, que corresponden a áreas menos contaminadas son P6, P7, P11, P16, P31, P23, P21 y P28, los cuales coinciden con los valores de IPA, y a este grupo se añaden los puntos P12, P25 y P22 los cuales en general tienen bajo grado de cobertura (656, 941 y 943 cm<sup>2</sup>) pero poseen especies toxisensibles como *Lecanora pulicaris* (Pers.) Ach. y *Lecanora thysanophora* R.C.Harris, por lo que se incluyen dentro de este grupo. Por lo tanto, se puede inferir que el valor de cobertura le da mayor sensibilidad a los datos, permitiendo un valor de IPA más ajustado a la biología de las especies, con base en especies toxitolerantes y toxisensibles.

Ambas metodologías coinciden en que los valores más bajos se encuentran en los puntos P5 y P8, y los más altos se encuentran en los puntos P28 y P21 (Tabla 7). El punto P5 se encuentra en la ruta de salida al Atlántico del país, la cual mantiene una alta afluencia de vehículos pesados durante todo el día, lo que explica la alta contaminación. Además, habría que evaluar el efecto que tiene la industria Cervecera con sus múltiples áreas de producción que se encuentran próximas a este punto. El punto P13 se encuentra en las cercanías del basurero municipal y del Cementerio General, de donde provienen fuertes emisiones de gases que saturan de contaminantes la atmósfera y son transportados por los vientos predominantes del noroeste hacia donde se localiza el punto P13. Por lo descrito anteriormente, se propone la implementación de dos estaciones de medición de la calidad del aire en dichos puntos, además se debería evaluar el efecto de la contaminación aérea sobre las personas que habitan o que transitan en ese sector.

Las áreas pobres en líquenes se ubican en los puntos más transitados, tales como avenidas principales, áreas comerciales, y pocas áreas residenciales y a pesar de que se incluyen 5 parques municipales se puede observar que éstos se ven afectados por el tránsito vehicular intenso a su alrededor. Las áreas en transición a su vez, se encuentran en la periferia de la ciudad, dentro de parques municipales o en puntos cercanos a barrancos de áreas verdes. Los barrancos del Área Metropolitana de Guatemala (AMG), dada su condición orográfica, se caracterizan por ayudar a limpiar el aire, en donde existe una vía libre para la circulación del viento proveniente del noreste la mayor parte del año. Esta condición representa una adecuada dilución y dispersión de los contaminantes gaseosos particulados, favoreciendo un continuo sistema de limpieza del aire en la ciudad (Álvarez, 2012, 8; MARN, 2009,250). Sin embargo, habría que analizar en un futuro el efecto del incremento de la carga vehicular para estos sitios, pudiendo incrementarse la contaminación y disminuir los valores de IPA y cambiar a clasificación “pobre en líquenes”.

En relación a los valores del ECF obtenidos (1.7 y 15.1) se puede observar que la mayoría se encuentran en la clase I (ausencia de líquenes) seguida por la clase II (pobre en líquenes) (Figura 35). El índice ECF considera la composición y la dominancia de cada forma de crecimiento. Los valores obtenidos indicaron una escala muy baja; esto se puede deber a que en realidad no existe mayor dominancia en cuanto a formas de crecimiento, ya que solamente

se encontraron líquenes costrosos y líquenes foliosos representando un 49% y 51% respectivamente. Los líquenes fruticosos son los primeros en desaparecer de un ecosistema urbano como consecuencia de la contaminación atmosférica (Hawksworth y Rose, 1970), lo que se confirma con los datos obtenidos, ya que no se encontraron líquenes fruticosos y el área con mejor calidad de aire se encuentra en la zona de clasificación de “área de transición”, lo cual es bastante bajo. Por lo tanto, por el alto grado de contaminación presente en la ciudad de Guatemala, este índice no resulta útil ya que la ausencia de líquenes fruticosos no permite evaluar a una escala más fina la comunidad liquénica.

Los datos de Lüking et al, 2011, fueron obtenidos de muestreos realizados en 5 de las 6 estaciones de medición de calidad del aire en la ciudad que monitorea la escuela de Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, más un parque natural (Hipódromo del Norte), un área residencial (Colonia El Maestro) y otro punto dentro de la Universidad (IGLU). Según el IPA reportado, en las estaciones IGLU e Hipódromo del Norte, la calidad del aire es excelente, mientras que para las estaciones INSIVUMEH, EFPEM, USAC-T10 y Colonia El Maestro la calidad del aire es normal y para las estaciones HINO e INCAP la calidad del aire está en estado de transición (Figura 38). Estos resultados tienen una alta coincidencia con los datos reportados por el laboratorio de calidad del aire, especialmente para las  $PM_{10}$ . Tomando en cuenta estos valores de IPA, se puede observar que en tres de las seis estaciones la calidad del aire va desde normal hasta excelente, y que el punto que presenta mayor grado de contaminantes es el INCAP, clasificándose en estado de transición. Sin embargo, estos resultados no reflejan la realidad de la calidad del aire de la ciudad capital, dado que todo el centro de la ciudad se encuentra en un área “pobre en líquenes”. Por otro lado, se debe considerar que los valores obtenidos por dichas estaciones indican que existen contaminantes en el aire que sobrepasan los valores requeridos por la OMS, pero no lo suficiente para incentivar la aplicación de leyes para mejorar la calidad del aire.

En el análisis de agrupamiento se identificaron dos grupos principales, uno con las áreas con valores menores de IPA+cobertura en un grupo pequeño, y el resto de puntos de muestreo en otro grupo, el cual a su vez contiene un subgrupo en donde se encuentran los sitios con mayores valores de IPA+cobertura. Esto confirma que los puntos P5, P8 y P14 se encuentran en las áreas con mayor grado de contaminación atmosférica y que los puntos P21, P23 y P28 se

encuentran en las áreas menos contaminadas de todos los puntos de muestreo, y el resto se encuentra en un área de transición que está siendo afectada por la contaminación. En los puntos P12, P25 y P26 se observó que los líquenes presentaban daños en su estructura, tales como zonas de blanqueamiento, lo que causa una disminución en la capacidad fotosintética y adaptativa del líquen. Según Crespo, Barreno, Sancho y Bueno (1977), esta alteración se presenta en ambientes contaminados, posiblemente como consecuencia de la pérdida de iones que induce alteraciones en las membranas celulares del alga asociada y ruptura de los mecanismos homeostáticos. Así mismo, en los puntos de transición P1, P4, P17, P18, P25, P26 y P32 se observaron talos estériles. Esto se explica con lo reportado por Hawksworth y Rose (1970), quienes indican que las estructuras reproductivas no se desarrollan en ambientes donde los líquenes están expuestos a contaminación y De Sloover y Le Blanc (1968) reportan que el  $\text{SO}_2$  estimula la producción de sorolios e isidios.

La reducción de tamaño de la misma especie en diferentes puntos de muestreo es uno de los caracteres más comúnmente reportado en estudios de líquenes como bioindicadores (Gaio y Branquinho, 1999; Carreras, Gudino y Pignata, 1998; Crespo et al., 1977; Hawksworth y Rose, 1970), así como se puede observar en el caso de *H. adglutinata* tiene mayor porcentaje de cobertura en el punto P23 y se encuentra ausente en los puntos P8 y P5.

En el modelo de ordenación se puede observar que dentro del grupo de puntos con menor IPA, más contaminados, está incluido el P1 que pertenece al Jardín Botánico de la Universidad de San Carlos. Una posible explicación a esto es que en el Jardín Botánico hay árboles muy altos, los que le dan sombra a las jacarandas de donde se tomaron los datos, lo que no permite que los líquenes allí presentes obtengan suficiente luz para su crecimiento. Y los puntos P21 y P28 con los IPA más altos, están agrupados con datos de contaminación intermedia, lo que indica que a pesar de poseer los valores más altos, no son lo suficientemente altos y que todos pertenecen a un área de transición. El punto P23 también posee un IPA alto pero no se encuentra agrupado con el P21 y el P28, lo que se debe a que la cobertura no es tan alta como en dichos puntos.

### Especies indicadoras

Con base en el factor Q se puede concluir que las especies foliosas toxitolerantes son *Leptogium azureum* (Sw. ex Ach.) Mont., *Physcia caesia* (Hoffm.) Hampe ex Fűrnr., *Physcia stellaris* (L.) Nyl., *Hyperphyscia adglutinata*\* (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt, *Candelaria concolor*\* (Dicks.) Arnold, *Leptogium milligranum*\* Sierk, *Pyxine cocoës*\* (Sw.) Nyl., *Physcia aipolia* (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr., *Parmotrema dilatatum* (Vain.) Hale, *Leptogium chloromelum* (Ach.) Nyl., *Hyperphyscia pandani*\* (H. Magn.) Moberg, *Leptogium austroamericanum* (Malme) C.W. Dodge, *Pyxine caesiopruinosa* (Tuck.) Imshaug, *Dirinaria applanata*\* (Fée) D.D. Awasthi y *Pyxine petricola*\* Nyl. Las especies que poseen un asterisco según los datos obtenidos por Lüking et al en el 2011, también son posibles bioindicadoras, debido a su bajo valor de Q. Las especies foliosas son más fáciles de identificar en el campo, por lo que son propuestas como guía para futuros estudios.

Cabe resaltar que la bioindicación con líquenes no puede evaluar condiciones ambientales o ecológicas por sí solas, y la idea de que los líquenes pueden reemplazar instrumentos fisicoquímicos no es del todo correcta. Sin embargo, los resultados presentados sugieren que los líquenes pueden complementar mediciones físico-químicas, especialmente en donde no existen estaciones para ello y pueden indicar áreas con problemas ambientales que necesiten investigación instrumental, como por ejemplo los puntos P5 y P13. Por otro lado, desde la Cumbre de la Tierra UNEP de 1992, la biodiversidad se convirtió en un factor clave en estudios ambientales, y los líquenes deben ser considerados valiosos por sí solos, y amenazados por la contaminación atmosférica. Actualmente, en la ciudad de Guatemala no se cuenta con una normativa específica que regule la concentración de contaminantes en el aire y las emisiones de las fuentes. Dado que el país es considerado sumidero de carbono, donde las absorciones son mayores que las emisiones, es importante no perder de vista el hecho que la contaminación aérea no solo provoca la pérdida de diversidad de especies, sino también se ve afectada la salud humana. Por lo tanto, se espera que la información obtenida a partir del presente estudio pueda utilizarse como base para incorporar los líquenes como complemento al monitoreo de calidad de aire en la ciudad Capital y otras zonas urbanas en el país.

## 10. CONCLUSIONES

- i. El corredor metropolitano (HN-HS) presenta una riqueza de líquenes de 65 especies, en donde 26 son nuevos registros para el país y 5 para la ciudad capital.
- ii. Las comunidades liquénicas dentro del corredor metropolitano (HN-HS) son altamente homogéneas dada una diversidad beta (13.38) baja.
- iii. Los datos indican que los puntos P8, P5 y P14 son las áreas con mayor grado de contaminación atmosférica y que los puntos P28, P21 Y P23 son las áreas menos contaminadas de todos los puntos de muestreo, y el resto se encuentran en un área de transición.
- iv. El índice Factor de Clasificación Ambiental -ECF- obtuvo valores bastante bajos debido a que no existe mayor dominancia en cuanto a formas de crecimiento costroso ni folioso.
- v. Las especies foliosas toxitolerantes son *Leptogium azureum* (Sw. ex Ach.) Mont., *Physcia caesia* (Hoffm.) Hampe ex Fűrnr., *Physcia stellaris* (L.) Nyl., *Hyperphyscia adglutinata* (Flörke) H. Mayrhofer & Poelt, *Candelaria concolor* (Dicks.) Arnold, *Leptogium milligranum* Sierk, *Pyxine cocoës* (Sw.) Nyl., *Physcia aipolia* (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr., *Parmotrema dilatatum* (Vain.) Hale, *Leptogium chloromelum* (Ach.) Nyl., *Hyperphyscia pandani* (H. Magn.) Moberg, *Leptogium austroamericanum* (Malme) C.W. Dodge, *Pyxine caesiopruinosa* (Tuck.) Imshaug, *Dirinaria applanata* (Fée) D.D. Awasthi y *Pyxine petricola* Nyl.
- vi. De las especies costrosas toxitolerantes cuatro pertenecen al género *Graphis* y dos al género *Arthopyrenia*.
- vii. No hay diferencia entre los sitios de muestreo en cuanto a composición de especies ( $\beta q_1=13.38$ ).
- viii. Guatemala actualmente es un país que no está obligado a regular, a través de normativa, las emisiones de gases de efecto invernadero. Todas las acciones se tendrán que enmarcar en futuros instrumentos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en el país.

## **11. RECOMENDACIONES**

- i. Los estudios en torno a la dinámica de la contaminación del aire son escasos. Con la metodología de IPA se puede dar un seguimiento periódico a la contaminación, de manera rápida, económica y confiable, para lograr una red de monitoreo en la Ciudad de Guatemala.
- ii. Los resultados pueden servir para incentivar e implementar cambios a nivel político, técnico y cultural, que propicien el cuidado de la calidad del aire.
- iii. Se propone que se implementen dos estaciones de medición de la calidad del aire, una ubicada en la salida al Atlántico y otra en las cercanías al basurero municipal, ya que son las áreas más afectadas por la contaminación aérea.
- iv. Realizar un monitoreo en el área industrial del departamento de Guatemala, para analizar sus efectos sobre la calidad del aire.
- v. Motivar el estudio de líquenes ya que son valiosos por si solos, y se encuentran amenazados por la contaminación atmosférica.

## 12. REFERENCIAS

- Álvarez, J. (2012). *Informe anual 2011: monitoreo del aire en la ciudad de Guatemala*. Universidad de San Carlos de Guatemala y Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Guatemala. USAC.
- Anze, R., Franken, M., Zaballa, M., Pinto, M., Zeballos, G., Cuadros M., et al. (2007). Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA*, 53-74.
- Aptroot, A., Lücking, R., Sipman, H., Umaña, L. Chavez, H. (2008). Pyrenocarpous lichens with biunicate asci: a first assessment of the lichen biodiversity inventory in Costa Rica. *Bibliotheca Lichenologica*. 97:1-162.
- Axpucac, S. (2005). *Caracterización de material particulado menor a 10µM-PM<sub>10</sub>-colectados en dos puntos de muestreo de la ciudad de Guatemala*. Tesis para optar al título de Químico, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Barclay, P. (1992). Lichens of *Cocos nucifera* on Caye Caulker, Belize. *Lichenologist*. 24:249-254.
- Barillas, R. y Lücking, R. (1992). Líquenes folícolos de Guatemala. Un estudio taxonómico preliminar. *Cryptogamie, Bryol. Lichénol*, 13,4, 297-317.
- Bretschneider, S. y Marcano V. (1995). Utilización de líquenes como indicadores de contaminación por metales pesados y otros agentes en el Valle de Mérida. *Forest Venez.* 1:35-36.
- Brodo, I., Sharnoff, S.D. y Sharnoff, S. (2001). *Lichens of North America*. Italia: Yale University press.
- Carreras, H. Gudino, G. y Pignata, M. (1998). Comparative biomonitoring of atmospheric quality in five zones of Cordova city employing the transplanted lichen *Usnea* sp. *Environmental Pollution*. 103:317-325.
- Chaparro, M. y Aguirre, J. (2002). *Hongos liquenizados*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.
- Cohn, G. y Sunum, R. (2012). Líquenes de Guatemala: Historia natural y lista actualizada. En Cano E. y Schuster J. (Eds) *Biodiversidad de Guatemala Volumen II*. Pp 63-113. Guatemala. Universidad del Valle de Guatemala.

- Coppins, B., Wolseley P. (2002). Lichens of tropical forests. En Watling, R., Frankland, J., Ainsworth, A., Isaac, S., Robinson, C. (Eds.), *Tropical mycology*. Vol 2: Micromycetes. 113-131.
- Coutiño B. (1986). Líquenes. En A. Lot y F. Chiang. *Manual de herbario. Administración y manejo de colecciones. Técnicas de recolección y preparación de ejemplares botánicos*. (pp. 65-73). México: Consejo Nacional de la flora de México, AC.
- Crespo, A., Barreno, E., Sancho, L. y Bueno, A. (1981). Establecimiento de una red de valoración de pureza atmosférica en la provincia de La Coruña (España) mediante bioindicadores liquénicos. *Lazaroa*. 3:289-311.
- Das, P., Joshi, S., Rout, J., Upreti, D. (2013). Lichen diversity for environmental stress study: application of index of atmospheric purity (IAP) and mapping around a paper mill in Barak valley, Assam, northeast India. *Tropical Ecology*. 54 (3): 355-364.
- Dixon, J., Kelly, D. (1979) A study of Jamaican lichens. En: Davis, C. (Es.) *Proceedings of a symposium on environmental studies in Jamaica*. University of West Indies. 193-200.
- Edder, A. (1996). *Botánica ambiental aplicada: Las plantas y el equilibrio ecológico de nuestra tierra*. EUNSA. España. 205 pp.
- Estrabou, C. (1998). Lichen species identification and distribution according tolerance to airborne contamination in the city of Córdoba (Argentina). In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB 1998:65-169.
- Fernández, A., Terrón, A. y Barreno, E. (2006). Bioindicadores de la calidad del aire en La Robla diez años después. *LAZAROA*, 27, 29-41.
- Fundación para el Ecodesarrollo y la conservación [FUNDAECO]. (2005). *Propuesta técnica para el establecimiento del Cinturón Ecológico Metropolitano de la Ciudad de Guatemala*. Capítulo Metropolitano. Guatemala.
- Gaio-Oliveira, C. y Baranquinho, C. (1999). Spatial impact of atmospheric dust from a cement mill in Sierra da Arrábida, using lichens as biomonitoring. *Revista de Biología*. 17:33-42.

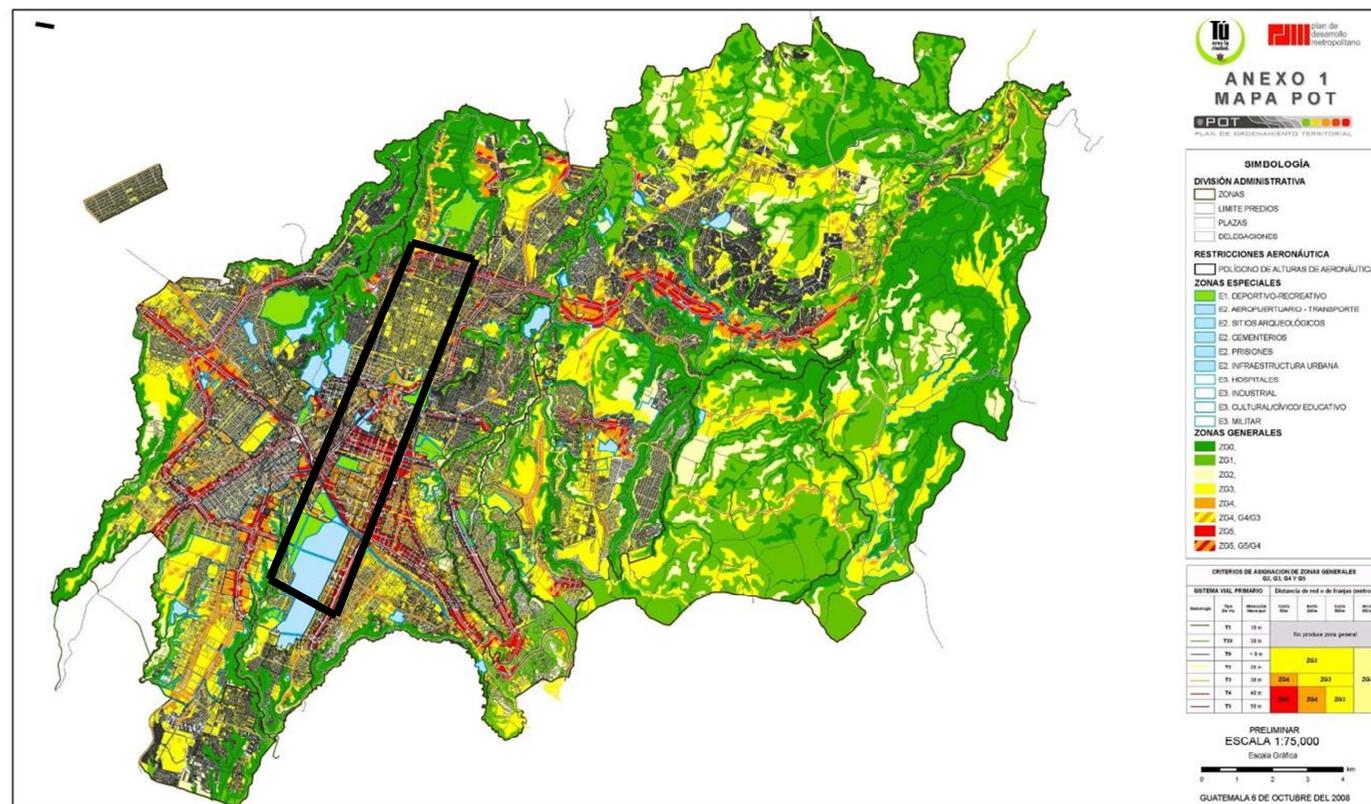
- García, M, Guerrero, D., Marcelli M., Saiki M. (1997). Aplicação didática de um estudo sobre indicadores de poluição na cidade de Guarulhos, Estado de São Paulo. En Marcelli, M. Salino A., Ribeiro C. (Eds), *Recollecting Vaino y GLAL-3, Catas Atlas, International Association for Lichenology*. Brasil.
- Gonzáles, S. (2007). Los líquenes: Ecología y utilidad. Curso avanzado de bioquímica del suelo, la naturaleza de los aportes naturales. España. Recuperado de: <http://weblogs.madrimasd.org/universo/archive/2007/03/12/60989.aspx>
- Hale, M. (1979). *How to know the lichens* (2ª ed.). Estados Unidos: Smithsonian institution.
- Hawksworth, D., Iturriaga, T. y Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22, 71-82.
- Hawksworth, D. y Rose, F. (1970). Qualitative scale for estimating sulphur dioxide air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. *Nature*. 227:145-48.
- Herrera, T. y Ulloa, M. (1990). *El reino de los hongos: Micología básica y aplicada* (1ª ed.). México: Fondo de Cultura Económica, SA de CV.
- Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología [INSIVUMEH]. (2013). Boletín de la calidad del aire BCA 210-2013 del 31 de Julio 2013. Guatemala. Disponible en: <http://www.insivumeh.gob.gt:8080/calidadaire/documentos/BOLETIN%20CALIDAD%20AIRE%2031%2007%202013.pdf>
- Jongman, R., Braak, T. y Tongeren, O. (1995). *Data Analysis in community and landscape ecology*. Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Jost, L. (2006). Entropy and diversity. *OIKOS*, 113 (2), 363-375.
- Kricke, R. y Loppi, S. (2002). Bioindication: The IAP approach. En P.L Nimis, C. Scheidegger y P. A. Wolseley (Eds.), *Monitoring with lichens- Monitoring lichens* (pp.21-37). Holanda: Kluwer Academic Publishers.
- Käffer, M. (2011). *Biomonitoramento da qualidade do ar com uso de liquens na cidade de Porto Alegre, RS*. (Tesis de Doctorado). Universidade Feredal do Rio Grande do Sul. Brasil. 220 pp.

- Kett, A., Dong, S., Andrachuk, H. y Craig, B. (sf). *Aprendiendo con líquenes: uso de líquenes epífitos como indicadores biológicos de contaminación del aire.* (s.l).
- Le Blanc, F. y Sloover, J. (1970). Relation between industrialization and distribution and growth of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian Journal of Botany*. 48:1485-1496.
- Lücking, R., Chaves, J., Sipman, H., Umaña, L., Aptroot, A. (2008). A first assessment of the ticolichen biodiversity inventory in Costa Rica: the genus *Graphis*, with notes on the genus *Hemithecium* (Ascomycota: Ostropales: Graphidaceae). *FIELDANA: BOTANY*. 46:1-130.
- Lücking, R., Rivas, E., Chavez, J., Umaña, L. y Sipman, and H. (2009) .How many lichens are there... really? *Bibliotheca Lichenologica*. 100: 399-418.
- Lücking, R., Sipman, H., Umaña, L. (sf). *Guía para géneros de líquenes tropicales.* S.l. Ticolichen. The Field Museum.
- McCune, B. y Grace, J. 2002. Analysis of ecological communities. MjM Software Design. Estados Unidos. 300 pp.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales [MARN]. (2011). Informe Ambiental del Estado de Guatemala. Guatemala.
- Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales – Universidad Rafael Landívar/ Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [MARN-URL/IARNA-PNUMA]. (2009). *Informe ambiental del estado- GEO Guatemala 2009.* Guatemala.
- Ministerio de salud pública y asistencia social [MSPAS]. (1999). Densidad poblacional de Guatemala. Recuperado de: [www.geosalud.com](http://www.geosalud.com)
- Moreno, E., Sánchez, A., Hernández, J. (2007). *Guía ilustrada de hongos liquenizados de Venezuela.* Venezuela: Departamento de publicaciones, Fundación instituto botánico de Venezuela.
- Municipalidad de Guatemala [MUNIGUATE]. (2011). Atlas ciudad. Recuperado de: [www.infociudad.muniguate.com](http://www.infociudad.muniguate.com)
- Nash, T.H. III (ed.). (1996). *Lichen Biology.* England: Cambridge University Press.

- Oliva, P. (2010). Deterioro de la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, un aspecto ambiental que limita el desarrollo sostenible. *Revista científica*, 18(1), 1-10. Instituto de Investigaciones Químicas y Biológicas. USAC. Guatemala.
- Purvis, W. (2000). *Lichens*. Londres: Natural History Museum.
- Quilhot W, Fernández E, Rubio C, Goddart M, Hidalgo ME. (1998). Lichen secondary products and their importance in environmental studies. In: Marcelli MP, Seaward MRD (Eds.) *Lichenology in Latin America: history, current knowledge and applications*. São Paulo, CETESB, 1998:171-179.
- Saipunkaew, W., Wolseley, P., Chimonides, J., Boonpragob, K. (2004) Lichens as monitors of urban pollution in northern Thailand. En: Randlane, T., Saag, A. (Eds.) *IAL5 Book of abstracts: Lichens in focus*. Tartu. 67-68.
- 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. Contam. Ambient.* 22(1) 49-58.
- Sipman, H. (2005a). *Identificación key and literature guide to the genera of Lichenized Fungi (Lichens) in the Neotropics*. Botanic Garden & Botanical Museum Berlin-Dahlem. Universidad de Berlin. Alemania.
- Sipman, H. (2005b). *Key to crustose, not foliicolous lichens*. Botanic Garden & Botanical Museum Berlin-Dahlem. Universidad de Berlin. Alemania.
- Sipman, H. (2005c). *Key to foliose lichens*. Botanic Garden & Botanical Museum Berlin-Dahlem. Universidad de Berlin. Alemania.
- Sipman, H. (2005d). *Compiled, provisional key to the species of Hyperphyscia, with short diagnoses*. Botanic Garden & Botanical Museum Berlin-Dahlem. Universidad de Berlin. Alemania.
- Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica [SERVIR]. 2011. Calidad del aire en Guatemala para los primeros 15 días de Enero del 2011. Disponible en: [http://www.servir.net/calidad\\_del\\_aire\\_en\\_guatemala\\_para\\_los\\_primeros\\_15\\_d%C3%ADas\\_de\\_enero\\_del\\_2011](http://www.servir.net/calidad_del_aire_en_guatemala_para_los_primeros_15_d%C3%ADas_de_enero_del_2011)
- Søchting, U. (1999). *Lichens of Bhutan: Biodiversity and use*. Dinamarca: University of Copenhagen, Botanical institute, Department of Micology.

- Suárez, M. (2004). *Determinación cualitativa de la relación que existe entre la concentración de las partículas totales en suspensión en su fracción respirable PM<sub>10</sub> y la función respiratoria de personas expuestas en dos puntos de muestreo en la ciudad de Guatemala*. (Tesis de Licenciatura en Química Farmacéutica). Universidad de San Carlos. Guatemala.
- Szczepaniak, K. y Biziuk, M. (2003). Ecotoxicology: Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. *Environmental Research*, 93(3), 221-230.
- Tormo, R. (2007). Lecciones hipertextuales de botánica: Historia de los líquenes. Universidad de Extremadura, España. Recuperado de <http://www1.unex.es/eweb/botanica/LHB/liquenes/liquen02.htm>
- Vareschi V. y Moreno, E. (1973). La contaminación en Caracas en los años 1953 y 1973. *Bol Soc Venez Ci Nat.* 30: 387-444.
- Verein Deutscher Ingenieure [VDI] 3957, Part 13. (2004). *Biological measurement procedures for determining and evaluating the effects of ambient air pollutants on lichens (bio-Indication): Mapping the diversity of epiphytic lichens as indicators of air quality*. 24 pp.
- Will-Wolf, S., Hawksworth, D. L., McCune, B., Rosentreter, R. y Sipman, H. J M. (2004). Lichenized Fungi. En G. M. Mueller, G. F. Bills & M. S. Foster (eds.), *Biodiversity of Fungi. Inventory and Monitoring Methods* (pp.173-195). Amsterdam: Elsevier Academic Press.

## 13. ANEXOS



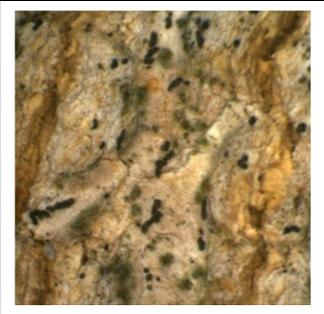
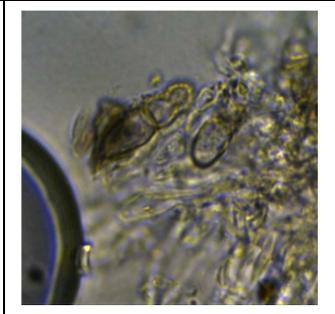
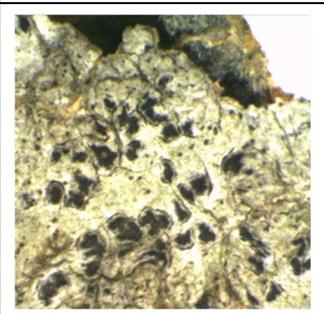
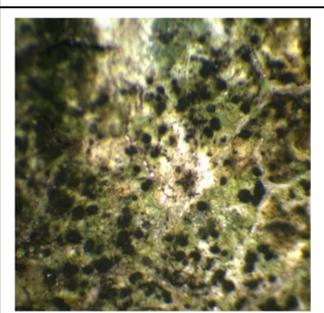
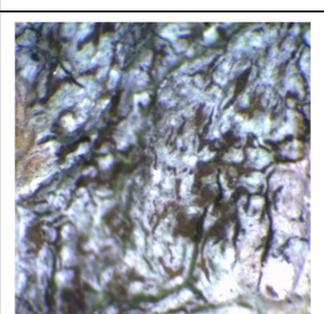
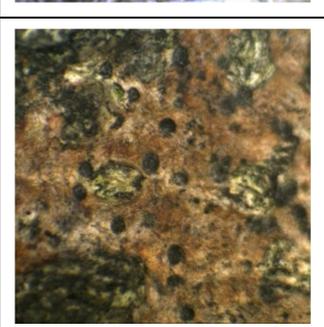
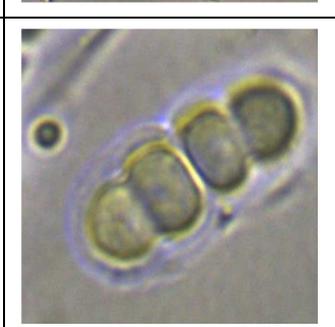
ANEXO I. Mapa del área de estudio (en cada cuadro de tomarán muestras de 4 árboles de *Jacaranda mimosifolia* D. Don.) obtenido de

[www.infociedad.muniguate.com](http://www.infociedad.muniguate.com)



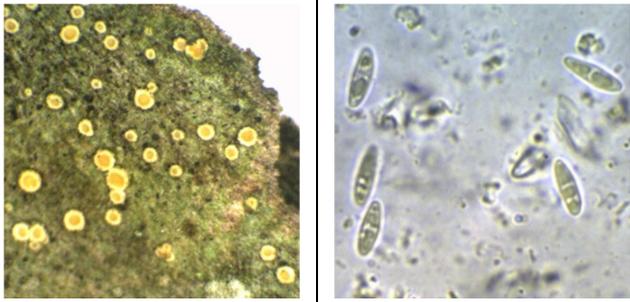
ANEXO II. Análisis de la calidad del aire del país realizado por CATHALAC (SERVIR, 2011).

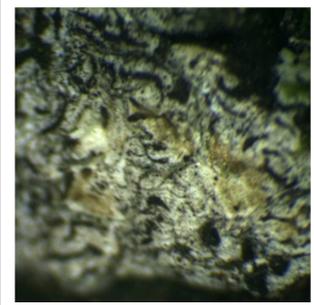
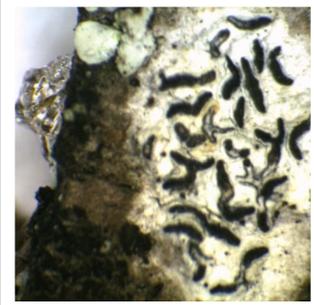
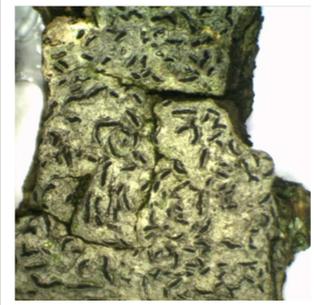
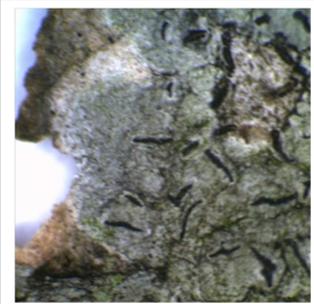
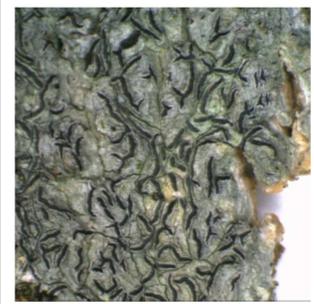
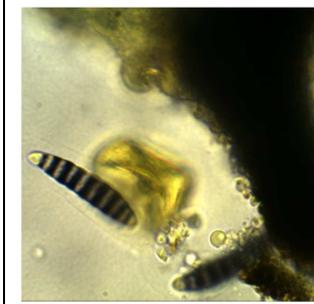
## ANEXO III. Guía Ilustrada de líquenes

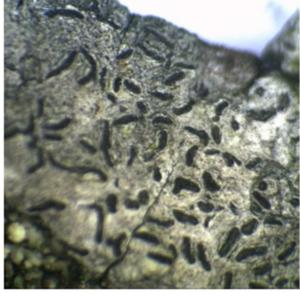
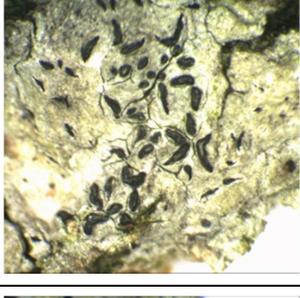
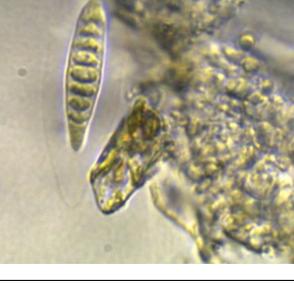
		<p><b><i>Arthonia caesia</i> H. Olivier</b> (ARTHONIACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, cuerpos fructíferos irregulares, azulados, pruinosos, esporas hialinas de 5x17 <math>\mu\text{m}</math>.</p>
		<p><b><i>Arthonia complanata</i> Fée</b> (ARTHONIACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, cuerpos fructíferos irregulares, negros, esporas hialinas, con 5 septos, de 8-22 <math>\mu\text{m}</math>.</p>
		<p><b><i>Arthonia patellulata</i> Nyl.</b> (ARTHONIACEAE)</p> <p>Talo costroso delgado, color verde grisáceo, cuerpos fructíferos irregulares. Esporas hialinas con un septo y un extremo más grueso que el otro, de 11x4 <math>\mu\text{m}</math>.</p>
		<p><b><i>Arthonia rubella</i> (Fée) Nyl.</b> (ARTHONIACEAE)</p> <p>Talo costroso, delgado, grisáceo, cuerpos fructíferos alargados, ramificados, color café-naranja, inmersos en el talo. Esporas hialinas, fusiformes con un lado más grueso que el otro, de 30x8 <math>\mu\text{m}</math>.</p>
		<p><b><i>Arthopyrenia cinchonae</i> Müll. Arg.</b> (ARTHONIACEAE)</p> <p>Talo costroso, café, con peritecios negros, esporas hialinas de 7x22 <math>\mu\text{m}</math>, con paredes reducidas en el septo.</p>

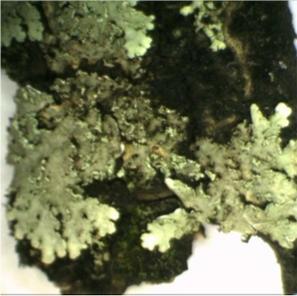
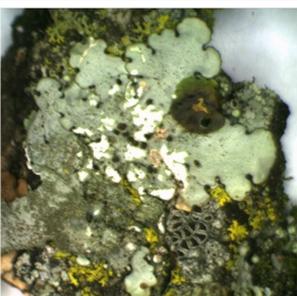
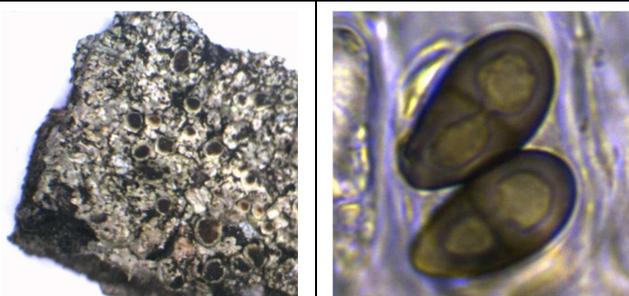
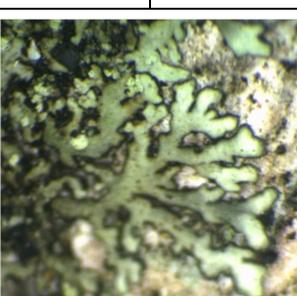
		<p><b><i>Arthopyrenia planorbis</i> (Ach.) Müll. Arg.</b> (ARTHOPYRENIACEAE)</p> <p>Talo costroso, blanco, con peritecios negros de 0.3mm, esporas de 19-20x5-6 <math>\mu\text{m}</math>, grisáceas, con 1 septo, paredes celulares constrictas o reducidas en el septo, haciendo un lado más engrosado.</p>
		<p><b><i>Bacidia rosella</i> (Pers.) De Not.</b> (RAMALINACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, apotecios rosados, de 0.5-1.2 mm de diámetro, con pruina, K+ amarillo, el margen de los apotecios más viejos se pierde, esporas hialinas, aciculares, con septos, de 5x55 <math>\mu\text{m}</math>.</p>
		<p><b><i>Bacidia schweinitzii</i> (Fr. ex Tuck.) A. Schneid.</b> (RAMALINACEAE)</p> <p>Talo costroso, gris verdoso, apotecios negros, esporas hialinas alargadas, de 4-5x50-70 <math>\mu\text{m}</math> con 12-14 septos.</p>
		<p><b><i>Caloplaca cerina</i> (Vain.) Zahlbr.</b> (TELOSCHISTACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo con gránulos, apotecios naranja, K+ púrpura, esporas hialinas de 6x16 <math>\mu\text{m}</math>, polariloculares.</p>
		<p><b><i>Caloplaca flavorubescens</i> (Huds.) J.R. Laundon</b> (TELOSCHISTACEAE)</p> <p>Talo costroso grisáceo, granuloso, apotecios de 1 mm de diámetro, con disco color naranja brillante K+ púrpura, con margen color naranja claro, sésiles y de margen crenulado, las esporas poseen un septo formando dos polos o lóculos.</p>

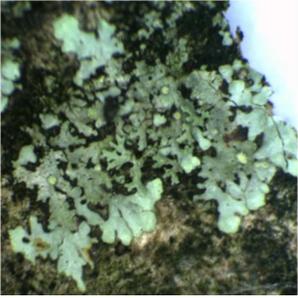
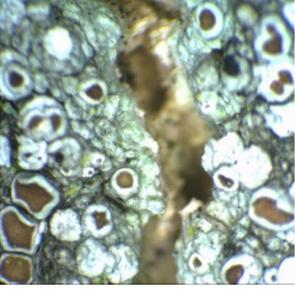
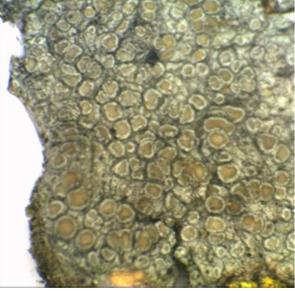
		<p><b><i>Caloplaca pollinii</i> (A. Massal.) Jatta</b> (TELOSCHISTACEAE) Talo costroso, verdoso, K+ púrpura, apotecios café oscuro, esporas hialinas polariloculares, de 8x16 <math>\mu</math>m.</p>
		<p><b><i>Candelaria concolor</i> (Dicks.) Arnold</b> (CANDELARIACEAE) Talo folioso, amarillo brillante, K-, lóbulos menores a 1 mm, elongados, con soledios granulares. Algunas muestras con apotecios pequeños con discos amarillos. Esporas hialinas de 4x10<math>\mu</math>.</p>
		<p><b><i>Candelaria fibrosa</i> (Fr.) Müll. Arg.</b> (CANDELARIACEAE) Talo folioso, amarillo brillante, K-, lóbulos pequeños, menores a 1 mm, sin isidios ni soledios, superficie inferior blanca, con rizinas. Apotecios con el disco color amarillo oscuro, esporas hialinas de 5x10<math>\mu</math>.</p>
	<p><b><i>Canoparmelia crozalsiana</i> (B. de Lesd.) Elix &amp; Hale</b> (PARMELIACEAE) Talo folioso, arrugado, con soledios, superficie inferior café, sin cilios, con rizinas negras, ausentes en los márgenes de los lóbulos. Talo y médula K+ amarillo. Sin apotecios.</p>	
		<p><b><i>Chroodiscus</i> sp.</b> (GRAPHIDACEAE) Talo costroso, gris, apotecios croodiscoides, esporas largamente fusiformes, hialinas, de 5x35 <math>\mu</math>m, con 7 septos.</p>

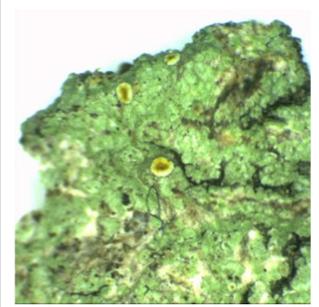
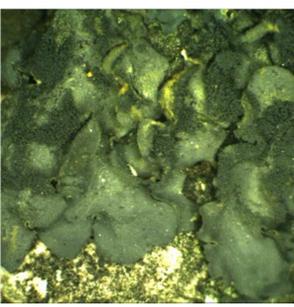
	<p><b><i>Coccocarpia palmicola</i> (Spreng.) Arv. &amp; D.J. Galloway</b> (COCCOCARPIACEAE)</p> <p>Talo folioso, gris oscuro azulado, lóbulos redondeados, abundantes isidios, superficie inferior con tomento oscuro, sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Coenogonium moniliforme</i> Tuck.</b> (COENOGONIACEAE)</p> <p>Talo filamentosos, con apariencia de costroso, color verde pálido, apotecios naranja pálido de 0.3mm, esporas hialinas con un septo, de 10-12x3-4 μm.</p>
	<p><b><i>Cryptothecia striata</i> G. Thor</b> (ARTHONIACEAE)</p> <p>Talo costroso gris verdoso, estéril, con protalo periférico blanco, con apariencia farinosa.</p>
	<p><b><i>Dirinaria applanata</i> (Fée) D.D. Awasthi</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso verde grisáceo, aplanado, lóbulos pequeños, menores de 3 mm, ramificados en el margen y aglomerados en el centro, K+ amarillo, corteza inferior negruzca sin rizinas ni cilios. Con soledios, sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Dirinaria picta</i> (Sw.) Schaer. ex Clem.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso verde grisáceo, aplanado, lóbulos pequeños, menores de 3 mm, ramificados y sin estar aglomerados en el centro, K+ amarillo, corteza inferior negruzca sin rizinas ni cilios. Con soledios, sin apotecios.</p>

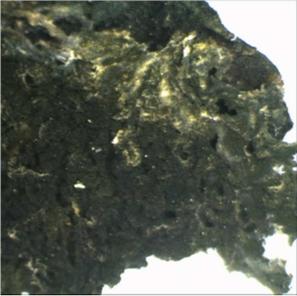
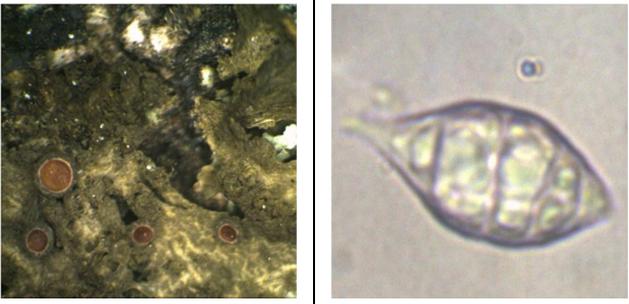
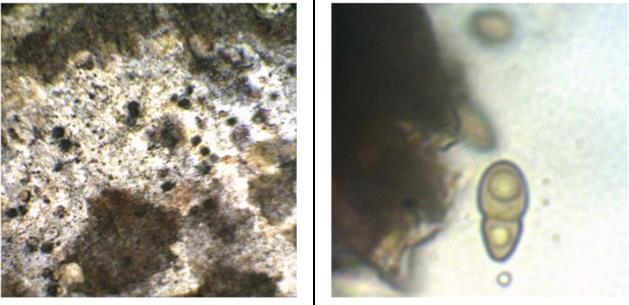
		<p><b><i>Enterographa micrographa</i> (Nyl.) Redinger</b> (ROCELLACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, lirelas negras pequeñas, de 0.1x0.8 mm, ascosporas hialinas con 3-4 septos, lúmenes rectangulares, de 5x17-20 <math>\mu\text{m}</math>.</p>
		<p><b><i>Graphis anfractuosa</i> (Eschw.) Eschw.</b> (GRAPHIDACEAE)</p> <p>Talo costroso, muy delgado, lirelas negras, sésiles, sin margen talino, labios enteros, excípulo completamente carbonizado, himenio insperso, esporas hialinas, de 10x35 <math>\mu\text{m}</math>, con 7 septos transversales.</p>
		<p><b><i>Graphis chondroplaca</i> (Redinger) Lücking</b> (GRAPHIDACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, lirelas negras, labios enteros, excípulo lateralmente carbonizado, himenio no insperso, disco no pruinoso, color café, ascosporas de 7x35 <math>\mu\text{m}</math>, con 9 septos.</p>
		<p><b><i>Graphis dracena</i> Vain.</b> (GRAPHIDACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, lirelas negras, erumpentes, de 0.1x1 mm, labios enteros, excípulo completamente carbonizado, himenio no insperso, sin sustancias liquénicas, ascosporas con 9 septos transversales, hialinas, de 8-10x40-42 <math>\mu\text{m}</math>.</p>
		<p><b><i>Graphis elegans</i> (Borrer ex Sm.) Ach.</b> (GRAPHIDACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, lirelas de 2x0.2-0.3 mm, negras, parcialmente ramificadas, de labios enteros a estriados, disco no expuesto, excípulo e hipotecio carbonizado, margen talino lateral, ascosporas café de 10x45 <math>\mu\text{m}</math>, con lúmenes lenticulares, con 8 septos, 1+.</p>

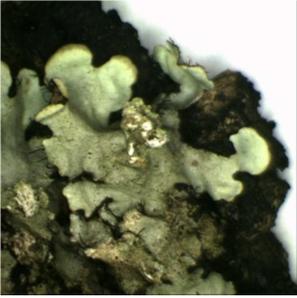
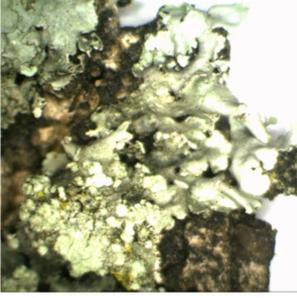
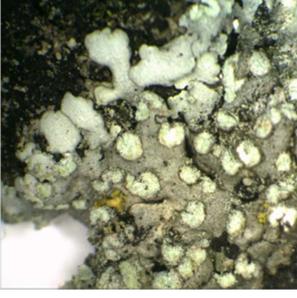
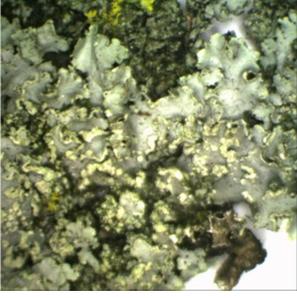
		<p><b><i>Graphis furcata</i> Fée</b> (GRAPHIDACEAE) Talo costroso, grisáceo, con lirelas negras de 0.1-0.2x1-1.5mm, labios enteros, con pruina, margen lateral talino, erumpentes, disco no expuesto, lateralmente carbonizado, himenio no insperso, esporas hialinas, de 6x31 µm, con 10 septos.</p>
		<p><b><i>Graphis librata</i> C. Knight</b> (GRAPHIDACEAE) Talo costroso, grisáceo, lirelas negras, de 0.1-1 mm, erumpentes, labios enteros, sin pruina, excípulo lateralmente carbonizado, himenio no insperso, talo K+ rojo por la presencia de ácido norstíctico, esporas con 9 septos, de 8-10x35-45 µm.</p>
		<p><b><i>Graphis lineola</i> Ach.</b> (GRAPHIDACEAE) Talo costroso, gris, levemente verdoso, lirelas negras de 0.1x0.5mm, labios enteros, sin pruina, erumpentes, margen lateral talino, excípulo lateral, esporas hialinas, de 7x28 µm, con 9 septos.</p>
		<p><b><i>Graphis rimulosa</i> (Mont.) Trevis.</b> (GRAPHIDACEAE) Talo costroso, grisáceo, con lirelas negras, erumpentes, labios enteros, con pruina, excípulo completamente carbonizado, margen talino ausente, himenio insperso, esporas hialinas de 7x27 µm, con 9 septos.</p>
		<p><b><i>Graphis submarginata</i> Lücking</b> (GRAPHIDACEAE) Talo costroso, gris blancuzco, lirelas negras, de 0.2x0.7 mm, labios enteros, erumpentes, disco más o menos expuesto, café con un poco de pruina, lateralmente carbonizado, margen lateral talino, himenio insperso, esporas hialinas, de 6x30 µm, 8 septos.</p>

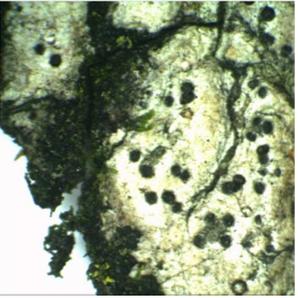
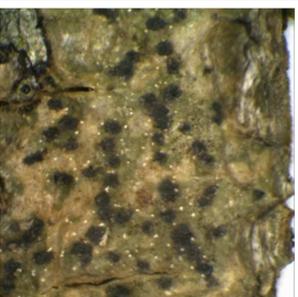
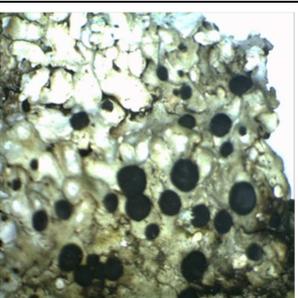
	<p><b><i>Heterodermia albicans</i> (Pers.) Swinscow &amp; Krog</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, lóbulos menores a 3 mm de ancho, superficie inferior blanca, con rizinas blancas, algunas grisáceas, soralios marginales, médula y talo K+ amarillo pasando a rojo. Sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Heterodermia diademata</i> (Taylor) D.D. Awasthi</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, gris claro, lóbulos &lt;3 mm, K+ amarillo, superficie inferior blanca, con rizinas blancas, algunas ramificadas. Apotecios con discos café, y márgenes un poco dentados. Esporas cafés con 1 septo, de 15-18x6-7 µm.</p>
	<p><b><i>Heterodermia granulifera</i> (Ach.) W.L. Culb.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, con isidios, K+ amarillo, médula blanca, K+ roja, superficie inferior café con rizinas negras. Sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Hyperphyscia adglutinata</i> (Flörke) H. Mayrhofer &amp; Poelt</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, color gris verdoso, lóbulos de 0.3-0.5 mm, superficie inferior oscura, sin cilios ni rizinas, con soralios verdosos. No posee prótalo negro en los lóbulos y la médula es blanca. Apotecios con disco negro, esporas cafés de 7x15µ, con 1 septo.</p>
	<p><b><i>Hyperphyscia minor</i> (Fée) Kalb</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, color gris verdoso, lóbulos pequeños de 0.3-0.5 mm, superficie inferior oscura sin cilios ni rizinas, con soralios verdosos. Presenta un prótalo negro en los lóbulos y médula blanca. Sin apotecios.</p>

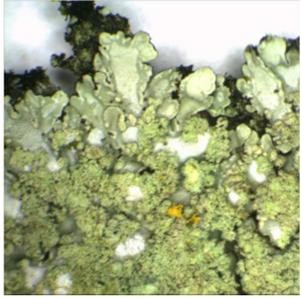
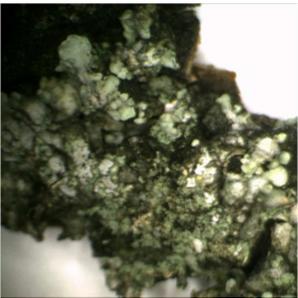
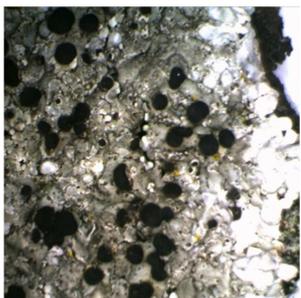
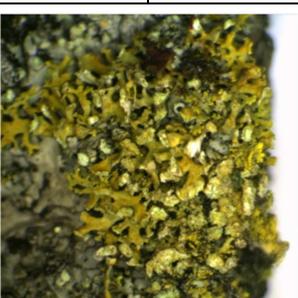
	<p><b><i>Hyperphyscia pandani</i> (H. Magn.) Moberg</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, color gris verdoso, lóbulos pequeños de 0.3-0.5 mm, superficie inferior oscura sin cilios ni rizinas, con soralios verdosos. No posee prótalo negro en los lóbulos y la médula es color naranja. Sin apotecios.</p>	
		<p><b><i>Hyperphyscia pyrrhocardia</i> (Müll. Arg.) Moberg &amp; Aptroot</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, color gris verdoso, lóbulos de 0.3-0.5 mm, superficie inferior oscura sin cilios ni rizinas, con soralios verdosos. Presenta un prótalo negro en los lóbulos y médula color naranja. Apotecios con disco negro, esporas café de 8x17<math>\mu</math>, con 1 septo.</p>
		<p><b><i>Lecanora cupressi</i> Tuck.</b> (LECANORACEAE)</p> <p>Talo costroso, gris blancuzco, apotecios con disco amarillo y pruina amarilla, de 0.5-1.2 mm. Esporas hialinas simples, de 6-7x11-12 <math>\mu</math>m.</p>
		<p><b><i>Lecanora pulicaris</i> (Pers.) Ach.</b> (LECANORACEAE)</p> <p>Talo costroso, grisáceo, apotecios lecanorinos de 0.5-1.2 mm, disco naranja-rojizo, K+ amarillo. Esporas hialinas simples de 6x11 <math>\mu</math>m.</p>
		<p><b><i>Lecanora strobilina</i> (Spreng.) Kieff.</b> (LECANORACEAE)</p> <p>Talo costroso, verdoso, sorediado, apotecios lecanorinos de 0.4-1.1 mm, con el disco amarillo, K+ amarillo. Esporas hialinas, simples, elipsoides, de 4-6x13-15 <math>\mu</math>m.</p>

		<p><b><i>Lecanora thysanophora</i> R.C. Harris</b> (LECANORACEAE)</p> <p>Talo costroso, verde claro, de apariencia leprosa debido a la soralia granular, con un protalo blanco. Apotecios lecanorinos, con disco naranja claro. Esporas hialinas, simples, de 4x10µ.</p>
	<p><b><i>Leptogium austroamericanum</i> (Malme) C.W. Dodge</b> (COLLEMATACEAE)</p> <p>Talo folioso, gelatinoso, color gris plomo, con lóbulos de 3 cm de largo y delgados, superficie de los lóbulos con arrugas e isidios granulares abundantes, superficie inferior del mismo color que la superior y también con arrugas.</p>	
		<p><b><i>Leptogium azureum</i> (Sw. ex Ach.) Mont.</b> (COLLEMATACEAE)</p> <p>Talo folioso, gelatinoso, gris azulado, sin isidios, lóbulos delgados, redondeados hacia los márgenes, apotecios en la superficie del talo, constrictos en la base, con disco color naranja y márgenes café. Esporas hialinas, muriformes, de 10x22µ.</p>
		<p><b><i>Leptogium chloromelum</i> (Ach.) Nyl.</b> (COLLEMATACEAE)</p> <p>Talo folioso, gelatinoso, café, lóbulos gruesos y con arrugas, sin isidios, con apotecios abundantes, con disco naranja y márgenes arrugados. Esporas hialinas, muriformes, de 12x20µ.</p>
	<p><b><i>Leptogium marginellum</i> (Sw.) Gray</b> (COLLEMATACEAE)</p> <p>Talo folioso, gelatinoso, color verde grisáceo, con apotecios en los márgenes de los lóbulos, superficie inferior arrugada. No se observaron esporas.</p>	

	<p><b><i>Leptogium milligranum</i> Sierk</b> (COLLEMATACEAE)</p> <p>Talo folioso, gelatinoso, color café-oliva, lóbulos irregulares, arrugados y anastomosados, márgenes de los lóbulos ondulados con abundantes isidios granulares, superficie inferior sin pelos. Sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Leptogium phyllocarpum</i> (Pers.) Mont.</b> (COLLEMATACEAE)</p> <p>Talo folioso, gelatinoso, color verde grisáceo, lóbulos engrosados, con lamelas, superficie inferior oscura, arrugada y con parches de pelos blancos, apotecios naranja sumergidos en el talo con márgenes arrugados. Esporas hialinas, muriformes, de 12x25µ.</p>
	<p><b><i>Mycomicrothelia subfallens</i> (Müll. Arg.) D. Hawksw.</b> (TRYPETHELIACEAE)</p> <p>Talo costroso, con peritecios que no forman un mazedio, de 0.2 mm, esporas café, con 1 septo, formando un lóbulo más grande que otro, de 6-7x12-15 µm.</p>
	<p><b><i>Parmotrema crinitum</i> (Ach.) M. Choisy</b> (PARMELIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, con isidios, lóbulos &lt;3 mm, K+ amarillo, médula blanca, superficie inferior café, con cilios negros y rizinas negras ausentes en las puntas de los lóbulos. Sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Parmotrema dilatatum</i> (Vain.) Hale</b> (PARMELIACEAE)</p> <p>Talo folioso, gris verdoso, lóbulos &gt;5mm de ancho, con soralios marginales, sin cilios, corteza y médula K+ amarillo, superficie inferior negra, café hacia los márgenes y en las puntas blanca, con rizinas pequeñas y dispersas, ausentes en las puntas.</p>

	<p><b><i>Parmotrema mellissii</i> (C.W. Dodge) Hale</b> (PARMELIACEAE)</p> <p>Talo folioso, gris verdoso, superficie inferior café, con cilios negros en los márgenes y rizinas negras excepto en los bordes de los lóbulos, con soredios que parecen isidios. Médula y talo K-. Sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Physcia aipolia</i> (Ehrh. ex Humb.) Fűrnr.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, grisáceo, K+ amarillo, lóbulos de 1 mm de ancho, sin cilios, médula blanca, K+ amarilla. Superficie inferior blanca con rizinas blancas. Apotecios lecanorinos de 1-1.2 mm, café negruzco, con pruina. Esporas cafés, con 1 septo de 15-19x8-10 µm.</p>
	<p><b><i>Physcia americana</i> G. Merr.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, con soralios laminares, superficie inferior blanca, con rizinas blancas, sin cilios. Sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Physcia caesia</i> (Hoffm.) Hampe ex Fűrnr.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, lóbulos de 0.5-1 mm, con soralios granulares, médula K+ amarilla, superficie inferior café, con rizinas cafés. Sin apotecios.</p>
	<p><b><i>Physcia millegrana</i> Degel.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, lóbulos &lt;3 mm, con soralia marginal, K+ amarillo, médula blanca, K-, superficie inferior blanca, con rizinas blancas. Sin apotecios.</p>

	<p><b><i>Physcia solediosa</i> (Vain.) Lyngae</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso verde grisáceo, con lóbulos &lt;4mm, con soralios marginales blancos, superficie inferior negra, con márgenes blancos y rizinas dispersas color negro. Médula K+ amarillo. Sin apotecios.</p>
 	<p><b><i>Physcia stellaris</i> (L.) Nyl.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, grisáceo, lóbulos &lt;3mm de ancho, superficie inferior blanca, con rizinas pálidas, médula blanca, K-. Apothecios café oscuro, pruinosos. Esporas cafés, de 8x25µ, con un septo.</p>
 	<p><b><i>Pyrenula confinis</i> (Nyl.) R.C. Harris</b> (PYRENULACEAE)</p> <p>Talo costroso, blanco, con peritecios solitarios, ostiolo no hundido, negro, ascosporas muriformes, cafés, de 10-15x17 µm, con menos de 4 filas de lóculos.</p>
 	<p><b><i>Pyrenula punctella</i> (Nyl.) Trevis.</b> (PYRENULACEAE)</p> <p>Talo costroso, muy fino, color verde oliva, con puntos blancos, cuerpos fructíferos negros, no agrupados. Esporas cafés con 4 septos, de 12x34 µm, 8 esporas por asco.</p>
 	<p><b><i>Pyxine berteriana</i> (Fée) Imshaug</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, lóbulos K-, sin soredios, médula amarilla, superficie inferior negra, con rizinas negras. Apothecios negros, esporas cafés, de 8x15µ, con 2 lóculos angulares.</p>

		<p><b><i>Pyxine caesiopruinosa</i> (Tuck.) Imshaug</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, lóbulos con soledios y pruina, K-, médula amarilla, superficie inferior negra con rizinas negras. Apotecios negros, esporas café, de 10x21µ, con 2 lóculos angulares.</p>
	<p><b><i>Pyxine cocoës</i> (Sw.) Nyl.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, verde grisáceo, lóbulos &lt;3 mm, con soledios, médula y corteza K-, médula blanca, superficie inferior café, con venas, con rizinas negras, algunas blancas. Sin apotecios.</p>	
		<p><b><i>Pyxine petricola</i> Nyl.</b> (PHYSICIACEAE)</p> <p>Talo folioso, gris verdoso, pruinoso, sin soledios ni isidios, K-, médula blanca, superficie inferior negra, con rizinas negras, apotecios negros, con esporas café, de 8x20µ, con 2 lóculos angulares.</p>
	<p><b><i>Xanthoria candelaria</i> (L.) Th. Fr.</b> (TELOSCHISTACEAE)</p> <p>Talo folioso amarillo brillante, con algunas partes verdosas, con soraliós en las puntas de los lóbulos, superficie inferior amarillo claro, lóbulos K+ rojo-púrpura intenso. Sin apotecios.</p>	



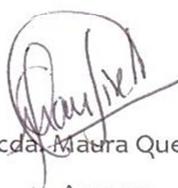
Gretchen Marie Cohn Berger

Tesista



Licda. Roselvira Barillas

Asesora



Licda. Maura Quezada

Asesora



Lic. Mario Cifuentes

Revisor



Ph.D. Sergio Melgar

Director Escuela de Biología



Ph.D. Oscar Cobar Pinto

Decano Facultad Ciencias Químicas y Farmacia