

DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE ISOCONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA MEDIANTE EL ANÁLISIS DE BIOINDICADORES (LÍQUENES EPIFITOS)

Delimitation of Atmospheric Iso-Contamination Areas in the Universidad Nacional de Colombia Campus by Analysis of Bioindicators (Epiphytic Lichens)

LUIS JUAN RUBIANO OLAYA, MARTHA CHAPARRO DE VALENCIA
Departamento de Biología, Facultad de Ciencias,
Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

Presentado marzo 26 de 2006, aceptado mayo 23 de 2006, correcciones junio 14 de 2006.

RESUMEN

Se elaboró un mapa de áreas de isocontaminación atmosférica en el campus de la ciudad universitaria, utilizando la capacidad bioindicadora de los líquenes para detectar cambios en la calidad del aire. Se determinaron cuatro zonas de contaminación, de acuerdo con la metodología de Le Blanc y De Sloover (1970): contaminación máxima, contaminación alta, contaminación moderada y contaminación baja. Las áreas más contaminadas por fuentes móviles se sitúan hacia las entradas de las calles 26 y 45. Muy contaminado se considera también el perímetro del campus, especialmente hacia la avenida 38A, la carrera 30 y la calle 26. La contaminación de estas zonas guarda estrecha relación con la ausencia de barreras vivas o setos arbóreos en dicho perímetro. Las zonas de contaminación máxima, al interior de la universidad, están influidas poderosamente por fuentes fijas como chimeneas, exostos industriales, calderas y extractores de los laboratorios académicos y por los grandes parqueaderos. Las mediciones físico-químicas de las emisiones fijas son escasas o nulas para la mayoría de los casos. El sector menos contaminado del campus se sitúa hacia el centro de la Ciudad Universitaria. Su ubicación obedece al efecto protector de las arboledas y edificaciones, a su alrededor, dando un efecto de barrera que bloquea con eficiencia las emisiones externas.

Palabras clave: líquenes, bioindicadores, contaminación atmosférica, calidad del aire, campus universitario.

ABSTRACT

A map of areas of atmospheric isocontamination was elaborated in the campus of the university, using the bio-indicator capacity of lichens to detect changes in air quality. Four areas of contamination were determined according to Le Blanc and De Sloover methodology (1970): maximum contamination, high contamination, moderate con-

tamination and low contamination. The polluted areas for mobile sources are located towards the entrances located at 26 and 45 streets. The perimeter of the campus is also very polluted mainly towards the 38A and 30 avenues and 26 street. The contamination of these areas relates with the absence of barriers or arboreal hedges in this perimeter. The areas of maximum contamination, to the interior of the university are influenced by fixed sources of contamination such as chimneys, exhausts, boilers and extractors of laboratories and the extended parking areas. Physico-chemical measurements of fixed emissions are scarce or null for most of the cases. The less polluted sector of the campus is located towards its center as a result of the protective effect of groves and constructions, giving an effect of continuous barrier that blocks the external emissions efficiently.

Key words: Lichens, bioindicators, atmospheric contamination, air quality, University Campus.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá, en el centro de Colombia, se erige sobre una extensa planicie de 383.000 hectáreas (DAMA, 1997) en la cual el casco urbano ocupa el 8%, es decir 30.000 ha. El 92% restante, que incluye a municipios tales como Facatativá, Madrid, Mosquera, Engativá, Chía, Cajicá, Zipaquirá y Gachancipá, están dedicados a la agricultura y ganadería con pequeños relictos de vida silvestre. Para el casco urbano de Bogotá, es relevante el hecho de que los componentes estructurales de la vegetación o áreas verdes, se agrupan en torno a ejes o corredores que ofrecen una relativa continuidad arbórea, o de cuerpos de agua o de ambos elementos (Rubiano, 2001). Desde una panorámica aérea se pueden observar seis grandes corredores verdes, dos de ellos, (los cerros Orientales y el río Bogotá), orientados en sentido norte sur y los cuatro restantes, río Tunjuelito, río Fucha, la calle 26 y el río Juan Amarillo, alineados en sentido oriente-occidente (DAMA, 1997). Éstos últimos corredores circunscriben a la mayoría de parques urbanos y áreas verdes del interior de la ciudad. En el caso de la calle 26, es significativa la presencia de amplias zonas forestales como son el parque El Salitre, el Club de Empleados Oficiales, el parque El Lago, el Jardín Botánico de Bogotá y el campus de la Universidad Nacional de Colombia. La Ciudad Universitaria, con 121,35 ha (Universidad Nacional, Oficina de Planeación, 2004) condensa la mayor área verde del interior de la ciudad, con excepción, quizás, del Club Los Lagartos, al noroccidente del casco urbano. La gran extensión del campus universitario le confiere a este sector de la ciudad un estatus de isla ambiental, con particularidades bien especiales en lo que se refiere al clima (vientos, temperatura), vida silvestre, calidad del aire y distribución interna de áreas de isocontaminación.

BIOINDICADORES DE CONTAMINACIÓN

Desde las cinco últimas décadas, el aire de la ciudad de Bogotá se ha visto afectado por el vertimiento de todo tipo de sustancias, principalmente material particulado, SO_x, NO_x, CO, CO₂, y otras, procedentes de la combustión del carbón y del petróleo, de la industria metalmeccánica y de otras industrias. Cada agente contaminante actúa sobre

los seres vivos y los ecosistemas urbanos, produciendo una respuesta diferenciada de acuerdo con la combinación, concentración y permanencia en el ambiente de dichos contaminantes. En otras palabras, la observación de los cambios en los organismos bioindicadores puede dar un indicio de la calidad del medio en que ellos se desarrollan. Los líquenes, y en particular algunas de sus especies, están mundialmente reconocidos como los organismos más sensibles frente a los efectos nocivos de la contaminación atmosférica. Existe, por lo general, una buena correlación entre la diversidad de los líquenes y la concentración de contaminantes, principalmente SO₂ y CO (Giordani, 2006). Los síntomas de daño se pueden evidenciar en forma de reacciones morfofisiológicas de los individuos y poblaciones (por ejemplo, disminución de la cobertura o de la producción de propágulos), y en forma de reacciones ecológicas en las comunidades liquénicas, *v.gr.* cambios de distribución espacial y de patrones de diversidad. En poblaciones liquénicas sometidas a emisiones puntuales de fuentes fijas, por ejemplo termoeléctricas, se presentan cambios morfológicos bastante notables siendo posible evaluar el impacto mediante técnicas de trasplante (Ibagos, 1977; Conti y Cecchetti, 2001). En fuentes de origen difuso, por ejemplo, el casco urbano en las ciudades, las respuestas ecológicas de los líquenes se evalúan a través de cambios en la diversidad y en la frecuencia-cobertura de las especies. En ambos casos lo que en realidad denotan los bioindicadores son las respuestas a la inmisión, es decir, a la mezcla de todos los contaminantes presentes en la zona de estudio (Rubiano, 2002). No obstante, existe buena información sobre la bioindicación de los líquenes en casos concretos de contaminación por SO₂, CO y NO_x (Giordani, 2006; Fuentes y Rawe, 1998). El presente estudio pretende determinar las áreas de isocontaminación atmosférica en la Ciudad Universitaria mediante la evaluación de la presencia, frecuencia, abundancia y diversidad de los líquenes del campus universitario. Así mismo busca llamar la atención sobre la calidad del aire en el campus e incentivar el cuidado y protección del arbolado de la Universidad Nacional y de las epífitas (líquenes principalmente) asociadas a éste.

MATERIALES Y MÉTODOS

OBTENCIÓN DE PLANOS Y FOTOGRAFÍAS AÉREAS

Con el fin de contextualizar el área de estudio (campus de la Universidad Nacional), se obtuvieron los planos de los predios de la Ciudad Universitaria (Dirección de gestión, 2003) a escala 1:2.000, en formato AutoCad, y las fotografías aéreas respectivas del año 2005.

HOMOLOGACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO

Las condiciones de absoluta homogeneidad no se dan en la naturaleza debido a la complejidad de los factores ambientales que entran en juego. La viabilidad de los líquenes como bioindicadores requiere, no obstante, que los sitios de muestreo sean en cuanto a su hábitat lo más uniformes posibles con el objeto de que la varianza poblacional y de la comunidad sean mínimas para factores diferentes de la calidad del aire (Rubiano, 1989). Se homologaron las siguientes variables:

Estaciones de muestreo y forofitos. La unidad de muestreo para el estudio de la flora liquénica del campus de la Universidad fue la estación de muestreo, formada por un

grupo de cuatro árboles o forofitos de la misma especie, lo más cercanos posible unos de otros. La importancia de seleccionar los forofitos radica en que suelen existir diferencias en la diversidad de la flora líquénica asociada, dependiendo de la especie arbórea. Para el caso de la Universidad Nacional, la especie arbórea correspondió, en un 90% de los casos, a urapán o fresno (*Fraxinus chinensis*) y en una proporción reducida, al álamo temblón (*Populus tremuloides*) y a la yuca (*Yucca elephantipes*). En cada estación se realizó un inventario completo de los líquenes adheridos al tronco de los árboles, en alturas comprendidas entre cero y dos metros (en total cuatro árboles inventariados/estación). Se muestrearon solo árboles adultos sanos, con diámetro del tronco similar, excluyendo, en lo posible, árboles inclinados y/o muy delgados. En total se muestrearon 21 estaciones.

Clima. Las estaciones de muestreo deben ser lo más similares posible en cuanto a microclima se refiere. El muestreo se restringió a árboles verticales dado que la pendiente de un tronco influye en la distribución y cantidad de luz y humedad, y por tanto sobre la distribución y abundancia de los líquenes. Se excluyeron árboles delgados y jóvenes puesto que la vegetación líquénica presente en ellos se encuentra generalmente en un estado de desarrollo poco avanzado. Debido a la importancia del viento (con sus parámetros dirección y velocidad) en la dispersión de los contaminantes atmosféricos, se obtuvo la rosa de los vientos del aeropuerto Eldorado de Bogotá, para un período de 19 años (Ideam, 2005) y la del sector de Puente Aranda (Misión Siglo XXI, 1996).

PARÁMETROS DE LOS REGISTROS

Los registros tuvieron en cuenta dos tipos de información:

- Características del forofito: a) diámetro, b) altura total, c) inclinación.
- Características de los líquenes: a) especie, b) altura sobre el tronco, c) cobertura, d) fructificación, d) apariencia general del talo o vitalidad.

Para los registros se emplearon formatos y plantillas especialmente diseñadas (Rubiano, 1989). Se tomaron también registros fotográficos de las muestras utilizando cámara convencional tipo *reflex*, cámara digital y macrofotografía con estereoscopio de luz. La identificación del material fue realizada por los autores del presente informe, con ayuda de los especialistas del Herbario Nacional Colombiano, utilizando claves específicas para cada familia o género (Brodo *et al.*, 2001). Se emplearon reactivos específicos (Hale, 1969), en este caso, hidróxido de potasio (KOH), hipoclorito de sodio (decol) y fenil enediamina.

MÉTODOS ECOLÓGICOS PARA ESTIMAR LA CALIDAD DEL AIRE

Los métodos de trabajo desarrollados al utilizar los líquenes como bioindicadores de contaminación tienden a relacionar la presencia o ausencia de especies, su número, frecuencia de aparición, cobertura y los síntomas de daños externos o internos con el grado de calidad del aire. Con objeto de obtener mejores aproximaciones en la delimitación de áreas de isocontaminación, se han desarrollado métodos tendientes a cuantificar la aparición de comunidades líquénicas, valorando no sólo su presencia en el territorio, sino también su abundancia y, en la medida de lo posible, su grado de fertilidad y desarrollo. Le Blanc y De Sloover (1970) diseñaron el método del índice de

pureza atmosférica (IPA), que ha sido seguido por la mayoría de los investigadores que han abordado el tema desde una óptica ecológica. El IPA considera la comunidad de líquenes al igual que la presencia y distribución de sus especies en una región que presente zonas específicas de contaminación cuantificando los datos. Debido a ésto y a la amplia experiencia en evaluaciones similares en Colombia (Rubiano, 1987; Rubiano, 1989; Rubiano, 2002) se decidió emplear dicho índice para el presente estudio.

DELIMITACIÓN SOBRE EL PLANO DE LAS ISOLÍNEAS DE CONTAMINACIÓN

Se asume que la determinación de áreas homogéneas en cuanto al comportamiento de las comunidades líquénicas corresponde a áreas similares por niveles de contaminación (Rubiano, 1989). Con el objeto de definir estas áreas se agruparon los IPAs registrados, en clases de acuerdo con la dispersión y/o la similitud de los datos. Las clases y sus correspondientes niveles cualitativos de contaminación fueron:

IPAs 0 a 6 = Contaminación máxima

IPAs 6 a 10 = Contaminación alta

IPAs 10 a 22 = Contaminación moderada

IPAs >22 = Contaminación baja o sin contaminación

Para delimitar gráficamente las isolíneas en el mapa, se procedió de la siguiente manera: marcados los puntos correspondientes a las estaciones de muestreo, se unieron todos ellos de manera que cada estación estuviera conectada con las 20 restantes. Para hallar la intersección precisa de cada uno de los IPA límites (6, 10 y 22), en cada línea se realizó el siguiente cálculo:

$$\frac{IPA1 - IPA2}{S} = \text{Factor de conversión o unidad de IPA}$$

Donde S = distancia en centímetros entre los dos IPA. Cada factor de conversión es diferente según los diferentes IPAs y la distancia entre las estaciones respectivas. Para hallar la intersección buscada, (6, 10, 22) en la línea que une las dos estaciones consideradas se procede a sumar el factor de conversión (haciéndolo equivaler sobre el mapa a 1 cm) a partir de la estación de menor IPA, hasta llegar al IPA o intersección buscada. Finalmente se unen los números comunes (todos los 6, todos los 10, etc.) para formar las isolíneas, comenzando desde las menores. El resultado de tales cálculos se indica en la figura 1.

RESULTADOS

Se censaron 21 estaciones, para un total de 84 árboles, de los cuales setenta y tres fueron urapanes (*Fraxinus chinensis*), siete álamos temblones (*Populus tremuloides*) y cuatro yucas (*Yucca elephantipes*). Se reportaron 27 especies epífitas, de las cuales 19 fueron líquenes, cuatro musgos, dos hongos, un helecho y un alga. Los resultados ordenados se indican en la tabla 1, en donde se discriminan número y nombre de especies por estación, Factor Qi e índice IPA.

ESPECIES/ESTACION	15	11	4	17	9	20	16	1	10	13	8	22	21	12	14	19	5	6	7	3	2	18	QI
<i>Cladonia flaccidior</i>	664	493	18208	11012	6388	762	576	21543	3920	272	20288	3368	1240	3993	3686	2408	6713	9736	5776	24424	27332	5960	6.22
<i>Leccaria</i> sp.	1888	768	406	8640	3632		6400	6448	1268	3264	4640			3456	6672	2624	4	194	8876	2080	4907	1472	6.55
<i>Parasitrema pruilatum</i>	12			4	10	72	36	80	318		24	24		28	100	23		862	4		82	1024	6.54
<i>Protococcus</i> sp.	5376	544	384	2528	640	13184	14976	224	6176	10592	2400	640	2752	4256	14246	7188	1644	64	16320	1152	6592	11816	6.22
<i>Heterotermia albicans</i>	856	1108	338		1226	3406	122	18	482		84	3920	3383	320	364	632	4476	259	530		4	2110	6.45
<i>Bryocryptellum campylacarpum</i>	1418	4			1612		68	32				448	3984	448	16	1112			32		64	1600	6.86
<i>Physa</i> sp.	8		6																4	256			6.25
<i>Canadella concolor</i>		2			48			2															7.33
<i>Fabronia ciliaris</i>	64			32																		1792	7.67
<i>Lecanora</i> sp.		512							384				448					1			24	6	8
<i>Usnea</i> sp.								10													97	9.5	
<i>Thelotrema</i> sp.								8															9
<i>Leparia</i> sp.							16	32							768							324	8.25
<i>Polyporus</i> (hongo)	48													8									7
<i>Heterotermia obscurata</i>			257						16	48				8				64	81	1216	1472	8	6.67
<i>Bryum argenteum</i>						208						3136											5.33
<i>Parasitrema</i> sp. (crespa)											236												6
<i>Ochrolechia</i> sp.																		32	166				7.5
<i>Ramalina celastri</i>																					13		10
<i>Parasitrema crinitum</i>															12							36	9
N.N. (Crustáceo gris)																					2		8
<i>Pertusaria</i> cf. <i>subpeltata</i>																							6
Hongo (bacre)																					28		6
<i>Rhynchostegium scarosum</i>																					6		6
<i>Peltigera</i> sp.																						6292	12
Helecho Epífito																						776	12
<i>Rhizoplaca</i> sp.																						9	12
No. de especies	8	8	6	5	7	5	7	5	10	5	7	6	4	8	6	7	8	9	8	7	11	13	
IPA	4.2	4.97	5.2	6.11	6.27	7.55	7.8	7.94	8.13	8.26	8.95	9.26	9.31	9.43	9.56	9.71	9.98	1460	15.97	18.89	21.2	34.1	



Figura 1. Zonas de isocontaminación atmosférica en el campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. I: Zona de contaminación máxima, II: zona de contaminación alta, III: zona de contaminación moderada, IV: zona de contaminación baja, o: fuentes fijas de contaminación.

ZONAS DE CONTAMINACIÓN

Zona 1 o de máxima contaminación. Corresponde a tres sectores que suman en total 11,7 hectáreas, es decir el 11,3% de la extensión total cubierta en este estudio. El primer sector, ubicado a lado y lado del camino peatonal que va de la portería de la calle 26 hasta la biblioteca Central, involucra las siguientes instalaciones dentro de su área de influencia: aulas y oficinas del departamento de Idiomas, aulas de Ingeniería Agrícola (edificio Antonio Nariño), la facultad y aulas de Ciencias Humanas y el museo de arquitectura Leopoldo Rother (Fig. 1). El segundo sector se ubica en los alrededores del corredor peatonal de la calle 45. Su área de influencia incluye el museo de arte, la torre de Enfermería (con el área de parqueo más grande de la universidad) y parcialmente el costado sur del auditorio León de Greiff y del conservatorio de música y costado nororiental del edificio Sindu, con sus parqueaderos respectivos. El tercer sector corresponde a una mancha elíptica que implica el laboratorio de ensayo de materiales y los laboratorios de Ingeniería Eléctrica y Mecánica y parqueadero aledaño a la central telefónica. Adicionalmente se presentan sectores de máxima contaminación, algo más pequeños y restringidos, como son el parqueadero de la facultad de Medicina y la intersección del anillo vial con la portería vehicular y peatonal de la transversal 38A.

Zona 2 o de contaminación alta. Con 52 hectáreas (51% del total), esta zona presenta el mayor cubrimiento dentro de la Ciudad Universitaria. Se extiende como una mancha que envuelve las áreas de máxima contaminación, hasta los límites del campus en sus costados noroccidental, suroccidental, y suroriental (Fig. 1). En su interior se ubican las facultades de Odontología, Agronomía y Economía, las aulas de Diseño

Gráfico (edificio Francisco de Paula Santander), parte de las aulas de Contaduría, la capilla de la universidad, el centro polideportivo, la biblioteca Central, el edificio Manuel Ancizar, las oficinas, laboratorios y bioterios de Veterinaria y Zootecnia así como su horno crematorio; el departamento de Bellas Artes, el departamento de Cine y Televisión, el IICA-CIRA, el centro de cómputo, el almacén de la universidad, los talleres de Ornamentación y Carpintería, el parqueadero y taller de mantenimiento de transporte, el colegio IPARM, las canchas de fútbol y el Estadio Alfonso López.

Zona 3 o de contaminación moderada. Se ubica entre la zona de contaminación alta y la de menor contaminación, con una prolongación hacia la intersección de la calle 53 con la carrera 30. Constituye la segunda mayor área (28 hectáreas, 27,5% del total), después de la de contaminación alta; involucrando las facultades de Derecho, Ingeniería y Veterinaria con sus respectivos laboratorios y aulas, la unidad de rescate de animales salvajes, URRAS, la clínica de grandes animales, las aulas y laboratorios de Histopatología e inseminación artificial, el corral de equinos, el laboratorio de Patología clínica y corral de bovinos y la clínica de pequeños animales. También se incluyen el edificio administrativo de la facultad de Ciencias, las aulas de informática, los departamentos de Matemáticas y Física y edificio de postgrados respectivos, los laboratorios de Hidráulica, el Ciaf, la parte trasera del Instituto Agustín Codazzi, el antiguo laboratorio Químico Nacional, el galpón de Biología, el Instituto de Ciencias Naturales y el Instituto de Genética.

Zona 4: contaminación baja o sin contaminación. Constituye un sector o mancha en forma de *boomerang* que se localiza hacia el centro de la Ciudad Universitaria rodeada por zonas de mayor contaminación. Su extensión es de 10,5 ha, es decir el 10,1% del total. Las construcciones involucradas son: departamento de Biología, Observatorio Astronómico, canchas de tenis, aulas de Ingeniería, departamento de Química, departamento de Farmacia, facultad de Medicina (sector posterior del edificio) y parte noreste del edificio de Arquitectura. Adicionalmente se presentan dos pequeños sectores con las mismas características, localizados también en áreas céntricas del campus, ellas son: edificio de Arquitectura, parte noreste y patio interior de las oficinas de Veterinaria (Fig. 1).

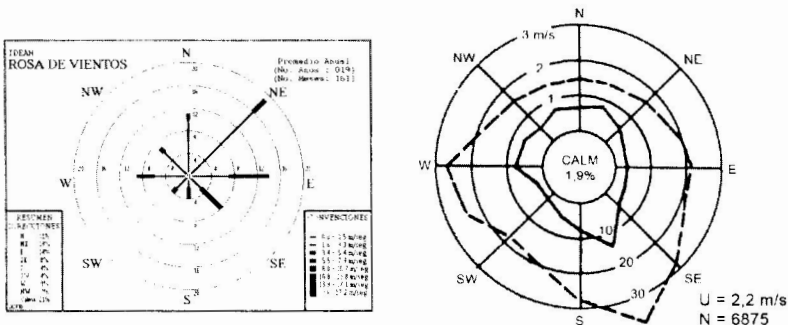


Figura 2. Rosas de vientos del sector de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.

DISCUSIÓN

LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL EN EL CONTEXTO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ

El medio aéreo bogotano presenta niveles variables de contaminación ambiental, generada principalmente por la emisión de gases y polvo. Los principales contaminantes del aire urbano son las partículas en suspensión, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, ozono e hidrocarburos no metálicos (Misión Siglo XXI, 1996).

Uno de los estudios de contaminación atmosférica más completos y confiables para la ciudad de Bogotá fue realizado por la Secretaría de Salud de Bogotá (SSB) junto con la Agencia Japonesa de Cooperación Técnica (JICA) en los años 90 y 91. El análisis de estos resultados fue complementado en el estudio Perfil Ambiental de Santafé de Bogotá (Misión siglo XXI, 1996) y transferido posteriormente a mapas de isocontaminación en el trabajo Atlas Ambiental de Santa Fe de Bogotá (DAMA, 1997). Aunque la información de estos mapas es bastante general, de ellos se deduce que el material particulado en algunos sectores de la ciudad es el único que alcanzaría niveles por encima de la norma del Ministerio de Salud, establecida en $76,8 \text{ mg/m}^3$ de aire. Para el sector industrial de Puente Aranda el promedio de partículas en el aire supera en un 70,2% para la mencionada norma; mientras que en el sector del hospital San Juan de Dios el exceso alcanza el 62% (DAMA, *op.cit.*). La Ciudad Universitaria, como la mayoría del casco urbano de la capital, permanecería con niveles promedio de partículas relativamente altos (55 mg/m^3), aunque por debajo de la norma del Ministerio de Salud. Los demás contaminantes monitoreados se encontrarían, según el DAMA (1997), en concentraciones relativamente bajas alcanzando en la Ciudad Universitaria, para el caso del SO_2 , una concentración de 15 ppb, siendo la norma para este gas 38,2 ppb. Igual sucede con el NO_2 , que en el sector de la Universidad Nacional muestra una concentración de 25 ppb cuando la norma máxima permitida es de 53,2 ppb. El monóxido de carbono también permanecería a bajas concentraciones, cuatro ppm, siendo la norma 13,1 ppm. La escala de estos mapas (aproximadamente 1:200.000) no permite aseveraciones precisas a nivel local y es obvio que estos datos son muy generales, basados en datos de estaciones de monitoreo insuficientes que, por supuesto, afectan la confiabilidad a nivel de detalle.

EL CASO DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL

Fuentes móviles. La situación de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá es bien particular: presenta dos avenidas perimetrales amplias (carrera 30 y calle 26) que funcionan como grandes focos o fuentes móviles de emisión de gases, y dos avenidas de menor calibre, la calle 53 y la transversal 38A (taponada parcialmente) con tráfico algo más reducido. Hacia el interior del campus es notoria la presencia de árboles alineados en setos o formando rodales, mezclados con las estructuras arquitectónicas. Las fuentes fijas dentro de la universidad se encuentran dispersas y corresponden a hornos crematorios, chimeneas pequeñas y los parqueaderos de las facultades y centros administrativos. La principal fuente móvil la constituye el anillo perimetral que rodea el campus. La distribución de las líneas de isocontaminación en la Universidad es bastante pecu-

liar si se compara con terrenos cuyos focos de contaminación son predominantemente de origen puntual o fijo. En dichos terrenos, las zonas de máxima contaminación o desiertos de líquenes aparecen a corta distancia de la fuente fija, que puede ser una planta industrial, una termoeléctrica, etc., rodeándose concéntricamente por zonas de menor contaminación que se van alejando de la fuente (Rubiano, 1989). En el caso de la Universidad, donde no se reconoce una fuente fija preponderante, pero sí dos o más fuentes móviles importantes, la distribución de las zonas de isocontaminación se invierte; apareciendo las zonas de mejor calidad de aire hacia el centro del campus. Alrededor de ellas se sitúan las zonas de mayor contaminación que se desplazan hacia el perímetro (Fig. 1). Ello se debe, con mucha probabilidad, al efecto protector de los árboles y de los edificios que actúan conjuntamente como barreras protectoras impidiendo el paso del *smog* desprendido por los automóviles.

Es importante destacar el papel de la dirección del viento en el transporte y rutas de acceso de los contaminantes al interior de la universidad. Para estimar la Rosa de los Vientos del campus, hemos tomado como referencia dos puntos cercanos a la Universidad: el aeropuerto Eldorado (Fig. 2; Ideam, 2005) y el sector de Puente Aranda (Fig. 2; Misión Siglo XXI, 1996). En el primer caso, las direcciones predominantes del viento provienen del oriente (nororiente, suroriente) y del norte y en Puente Aranda del suroriente y occidente. Es decir, durante la mayor parte del año, los vientos entrarían a la Universidad por la calle 53, la carrera 30, la capilla y la avenida 38A. Sin embargo, y para beneficio del campus, los vientos tropiezan con recias, aunque discontinuas, barreras que frenan o disipan su fuerza y contenido de sustancias nocivas. Nos referimos a las estructuras arquitectónicas y arboledas las cuales soportan todo el peso de las emisiones móviles, principalmente del material particulado. No obstante, al observar las fotografías aéreas (Fig. 3), no se evidencia un patrón que relacione la distribución de las zonas de isocontaminación de la Universidad con la sola presencia de árboles o con la sola presencia de estructuras. Lo que si es cierto, es que las dos actúan conjuntamente como barreras eficientes que protegen el centro del campus.



Figura 3. Vista aérea del campus de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, mostrando las edificaciones y arborizaciones.

En contraposición, es notoria la desprotección de los costados norte y occidente en donde son escasos o nulos los setos perimetrales que solo aparecen hacia la calle 53 (Instituto de Ciencias Naturales) y entre la carrera 37 y las diagonales 29, 30 y 31 (capilla de la Universidad). El resto permanece relativamente desnudo. Es significativo el hecho de que las zonas de mayor contaminación aparezcan precisamente hacia la calle 26 (abriéndose indefinidamente hacia el barrio El Recuerdo) y en la calle 45 con carrera 30. En esta última, la arborización del sector de la capilla, ha constreñido, muy probablemente, la correspondiente mancha de contaminación máxima, que bien podría extenderse a la periferia, como su homóloga de la calle 26, de no ser por la mencionada arboleda. Esto es muy importante puesto que de acuerdo con registros recientes, el flujo vehicular en la carrera 30 con calle 45 soporta 18.000 vehículos/hora, en horas pico, aunque contrariamente a lo esperado, la cantidad de partículas registradas (que oscila entre 131 y 296 mg/m³) no superan el valor máximo diario esperado (303,06 mg/m³) pero sí se le aproxima (Leguía Pachón, 2004; Cárdenas, 2003). Al tráfico vehicular puede atribuirse también la pequeña mancha de máxima contaminación situada en la intersección del anillo perimetral con la entrada de la transversal 38A (Fig. 1). En este caso, la contaminación sería ocasionada por el tráfico interno del campus y no por las grandes avenidas perimetrales. Según datos de la División de Vigilancia y Seguridad de la Universidad Nacional para el año 2004, en promedio semanal entran al campus 26.483 vehículos de los cuales la mayor parte (9.798 automóviles, es decir el 37%) ingresan por dicha portería. La segunda portería con mayor ingreso de vehículos en la de la calle 53, con 7.680 vehículos/semana (29% del total).

Fuentes fijas. Las fuentes fijas de contaminantes atmosféricos dentro del campus provienen de los laboratorios en donde se realizan prácticas docentes e investigativas y de la actividad profesional de instituciones gubernamentales establecidas por comodato dentro del campus (*v.gr.* Corpoica, Seisa). Gran parte de las emisiones son generadas durante el período académico y por lo general no son permanentes a lo largo del año. A esta categoría pertenecen dos manchas de contaminación máxima correspondientes al parqueadero de la facultad de Medicina, el cual, como todos los parqueaderos de la Universidad, estaría generando cantidades adicionales de gases y partículas (por la disminución de velocidad de los vehículos para parquear y/o arrancar o durante el enfriamiento de los motores, proceso en el que se liberan emisiones volátiles (Villamil, 2004); y el sector de Ensayo de Materiales donde el problema podría estar en la gran cantidad de extractores y chimeneas pequeñas emplazadas dentro o en cercanía de la mencionada zona como son: la caldera del laboratorio de Plantas Térmicas, monitoreada rutinariamente mediante un analizador de gases colocado en la base de su respectiva chimenea, el cual mide las concentraciones de CO₂, CO, NO_x y SO₂, dando en todos los casos, excepto para el NO_x, concentraciones por debajo de la norma. Los registros de NO_x en la base de la chimenea de la caldera son muy altos en todas las lecturas reportadas para el año 2005: 93 ppm, en promedio, cuando la norma, en el aire fuera de la caldera, es de 53,2 ppb (DAMA, 1997). El analizador de la caldera está calibrado para que las emisiones que salgan de la chimenea se ajusten a las normas establecidas; sin embargo, no existen analizadores, por fuera de la chimenea, que comprueben la concentración e inocuidad de tales emisiones. En una

chimenea de 15 m de longitud por 0,33 m de grosor, es difícil, sin medidores externos, suponer la disolución de concentraciones tan altas de óxidos de nitrógeno a niveles permitidos. La administración de salud y seguridad ocupacional (OSHA) ha establecido un límite de 25 ppm de monóxido de nitrógeno en el aire del trabajo durante una jornada de ocho horas diarias, 40 horas a la semana. La OSHA también ha establecido un límite de 5 ppm para exposición al dióxido de nitrógeno en el aire del trabajo durante un período de 15 minutos (ToxFAQs™ para óxidos de nitrógeno, 2006 *on line*). De otra parte, Fuentes y Rowe (1998), utilizando bioindicadores en un estudio en Sevilla, España, reportaron una fuerte correlación entre concentraciones altas de NO₂ y valores bajos del índice IPA. Niveles bajos de este óxido en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones, y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea. La exposición a bajos niveles también puede producir acumulación de líquido en los pulmones uno o dos días luego de la exposición. Respirar altos niveles de óxidos de nitrógeno puede rápidamente producir quemaduras, espasmos y dilatación de los tejidos en la garganta y las vías respiratorias superiores, reduciendo la oxigenación de los tejidos del cuerpo, produciendo acumulación de líquido en los pulmones y la muerte (Calderón *et al.*, 1995). Otras fuentes fijas de este sector son: el exhosto de motor diesel del laboratorio de Motores de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, extractores de los laboratorios de Física e Ingeniería Ambiental, chimenea del laboratorio de Suelos, calderas de Ingeniería Química, extractores de los laboratorios de Química y Farmacia y parqueaderos de Ingeniería Hidráulica y Mecánica, para los cuales no existe un monitoreo rutinario de sus emisiones.

En cuanto a los residuos, existen varios centros de acopio y tratamiento, por ejemplo, el centro de compostaje para desechos orgánicos, al sur de la Hemeroteca Nacional en límites con la calle 26, el centro de acopio de residuos sólidos, frente a los talleres de Ornamentación y de Mecánica de la unidad de transportes y el horno incinerador para residuos orgánicos peligrosos, emplazado en la parte posterior del circuito de edificaciones que conforman producción animal e investigaciones avícolas. A partir del año 2000, la Universidad centralizó la incineración de residuos patológicos en este horno donde, además de la cremación, se monitorean permanentemente las emisiones de material particulado, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxido de carbono. Para estos compuestos, las concentraciones en el aire, se encuentran por debajo de la norma del Ministerio de Salud (Inamco, 2002).

MEDICIONES CUANTITATIVAS

Es difícil predecir una cifra cuantitativa para la concentración de algunos de los contaminantes más comunes en el campus de la universidad, (SO_x, NO_x, CO₂, material particulado) asociados con la zonas reportadas en este estudio. En realidad, lo que indican las variables morfo-fisiológicas y ecológicas de las especies líquénicas son las cantidades de inmisión o mezcla de los contaminantes presentes. Al contrario de países como Inglaterra (Hawksworth y Rose, 1970) en donde la red de monitoreo de contaminantes es suficientemente amplia como para relacionar la sintomatología de los bioindicadores con las mediciones físico-químicas, en nuestro país son muy pocas

las mediciones cuantitativas que relacionen y calibren las zonas de contaminación indicadas por los líquenes, con las mediciones físico-químicas respectivas. En Rubiano, 1986, se pudo comprobar la correlación entre una zona de máxima contaminación indicada por los líquenes y la correspondiente medición cuantitativa. En este caso, la magnitud de material particulado, medido con un muestreador de alto volumen o *High Vol*, reportó en todas las lecturas de la Zona I, concentraciones de partículas por encima de la norma. Igualmente, para estudios de contaminación atmosférica en las ciudades de Cali y Medellín, utilizando líquenes como bioindicadores, pudo comprobarse la correlación de las zonas de máxima contaminación con los puntos o estaciones de monitoreo que registraban concentraciones de partículas por encima de la norma (Rubiano, 1987). En Medellín, reportes de SO_2 , NO_2 y formaldehído, concordaron, a *grosso* modo, con las cinco zonas reportadas por los líquenes (Rubiano, *op.cit.*). Dado que la Universidad Nacional cuenta con muchos de los equipos de monitoreo atmosférico, con el personal calificado y además con excelentes postgrados en medio ambiente, se hace imperativo sistematizar la información de calidad del aire y establecer programas interdisciplinarios en donde, por ejemplo, se comience a comprobar y calibrar la información brindada por los bioindicadores con aquella obtenida por los equipos físico-químicos.

CONCLUSIONES

Esta investigación se constituye en un documento base para el establecimiento de políticas tendientes a mantener y mejorar la calidad del aire del campus de la Universidad Nacional de Colombia. El empleo de bioindicadores para detectar la polución tiene una serie de ventajas tales como el bajo costo, los resultados rápidos y la posibilidad de proporcionar información acumulativa, integrada y discriminada gracias a su capacidad de respuesta frente a las alteraciones del medio, la cual nunca puede ser detectada a través de mediciones físico-químicas.

El biomonitoreo con líquenes es muy útil, además, para comprobar el mejoramiento de la calidad del aire cuando se logran reducir las emisiones. Ésto se ha comprobado en muchas ciudades europeas que disminuyeron sus emisiones por la clausura de varias termoeléctricas y el uso generalizado de gas metano en reemplazo de carbón o de gasolina (Conti y Cecchetti, 2001). Un buen ejemplo es la ciudad de Montecatini Terme, en el centro de Italia, en donde los desiertos de líquenes fueron recolonizados a partir del control y disminución de las emisiones industriales, particularmente el SO_2 (Palmieri *et al.*, 1997). Algo similar ocurre en Colombia (Rubiano, 2002) en donde un desierto de líquenes situado en proximidades de la Termoeléctrica de Zipaquirá, fue recolonizado por especies crustáceas de la familia *Graphidaceae*, musgos e inclusive helechos tras la colocación de filtros electrostáticos en el sistema de chimeneas de la planta. Con todo, el uso de biomonitores presenta algunos inconvenientes, debido a la imposibilidad de obtener resultados cuantitativos reales a causa de la complejidad de los mecanismos de interrelación y, principalmente, a la falta de equipos de monitoreo para calibrar los resultados biológicos con los detectados por los aparatos.

El mapa de isocontaminación demuestra que el campus es un pulmón verde que soporta y mitiga las emisiones de contaminantes producidos fuera de la Universidad. Esto es de suma importancia, no solo para el personal que estudia y labora diariamente en la Universidad sino para todos los usuarios que directa e indirectamente se relacionan con el campus. Un buen ejemplo lo constituyen los barrios El Recuerdo, Quinta Paredes y Rafael Núñez quienes, de no ser por el efecto barrera de la Universidad y de acuerdo con la dirección predominante de los vientos, recibirían todo el impacto de las emisiones de la carrera 30 y de la calle 53. Las áreas más contaminadas por fuentes móviles, según los bioindicadores, se sitúan hacia las porterías de las calles 26 y 45. Muy contaminado se considera también el perímetro del campus, en la avenida 38A, carrera 30 y calle 26. La distribución de estas zonas guarda estrecha relación con la ausencia de barreras vivas o setos arbóreos en dicho perímetro. Las zonas de contaminación máxima al interior de la Universidad están influenciadas fuertemente por fuentes fijas como las chimeneas, exhostos, calderas y extractores de los laboratorios académicos y por los grandes parqueaderos. Las mediciones físico-químicas de las emisiones fijas son supremamente escasas o nulas para la mayoría de los casos. El sector menos contaminado del campus se sitúa hacia el centro de la Ciudad Universitaria. Su ubicación obedece, muy probablemente, al efecto protector de las arboledas y edificaciones colocadas discontinuamente, pero de manera imbricada, a su alrededor, dando un efecto de barrera continua que bloquea eficientemente las emisiones externas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Departamento de Biología por su apoyo y facilidades logísticas que permitieron el buen término del presente estudio. A la División de Investigación - Bogotá DIB, por la financiación del trabajo. A la Facultad de Ciencias por el manejo ágil y oportuno de los fondos. A los profesores Édgar Linares, Jaime Aguirre y Jaime Uribe por su colaboración en la identificación de material biológico. A los ingenieros María Fernanda Aguilar, Gloria Beltrán, Juan Manuel Lizarazo, Paulo César Narváez, Martha Cristina Bustos y Jorge Eduardo Arango, por su amable colaboración en el suministro de información relacionada con las fuentes fijas de emisiones de gases y partículas. A Germán López por su contribución en la transcripción del mapa de áreas de isocontaminación.

BIBLIOGRAFÍA

- BRODO IM, SHARNOFF SD, SHARNOFF S. Lichens of North America. New Haven and London: Yale University Press; 2000.
- CALDERÓN CE, ROMERO F GÓMEZ LE. Salud ambiental y desarrollo. Ecosolar Ltda. Santa Fe de Bogotá; 1995.
- CÁRDENAS FA. Estudio exploratorio de la exposición de trabajadores ambulantes a las emisiones vehiculares en inmediaciones de la Universidad Nacional de Colombia [trabajo de grado]. Bogotá: Especialización en Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; 2003.

CONTI ME, CECCHETTI G. Biological Monitoring: Lichens as Bioindicators of Air Pollution Assessment - A Review. *Environ Pollut.* 2001;114(3):471-492

DAMA. Atlas ambiental de Santa Fe de Bogotá. Alcaldía Mayor de Santa Fe de Bogotá; 1997.

DIRECCIÓN DE GESTIÓN, DIVISIÓN DE RECURSOS FÍSICOS, GRUPO DE PLANEACIÓN Y PROYECTOS. Predio Ciudad Universitaria Sede Bogotá; 2003.

FUENTES JMC, ROWE JG. The Effect of Air Pollution From Nitrogen Dioxide (NO₂) On Epiphytic Lichens in Seville. Spain *Aerobiol.* 1998;14:241-247.

GIORDANI P. Is the Diversity of Epiphytic Lichens a Reliable Indicator of Air Pollution? A Case Study from Italy. In Press. 2006.

HALE ME. How to Know the Lichens. Wm. C. Iowa, USA: Brown Company Publishers.; 1969.

HAWKSWORTH DL, ROSE F. Qualitative Scale for Stimating Sulphur Dioxide Air Pollution in England and Wales Using Epiphytic Lichens. *Nature.* 1970;227:145-157.

IBAGOS AL. Contribución al estudio de la contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá [trabajo de grado]. Bogotá: Departamento de Biología, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; 1977.

IDEAM. Rosa de Vientos Aeropuerto El Dorado, promedio 19 años. Bogotá, D.C; 2005.

INGENIERÍA AMBIENTAL DE COLOMBIA LTDA. INAMCO. Informe técnico de soporte para gestión ambiental. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia; 2002.

LE BLANC F, DE SLOOVER J. Relation Between Industrialization and the Distribution and Growth of Epiphytic Lichens and Mosses in Montreal. *Can J Bot.* 1970;48:1486-1496

MISIÓN SIGLO XXI. Perfil ambiental de Santa Fe de Bogotá. Bogotá: DAMA, Fonade, Granahorrar; 1996.

PALMIERI F, NERI R, BENCO C, SERRACCA L. Lichens and Moss as Bioindicators and Bioaccumulators in Air Pollution Monitoring. *J Environ Pathol Toxicol Oncol.* 1997;16:175-190.

RUBIANO LJ. Delimitación de áreas de isocontaminación en Cali y Medellín utilizando líquenes como indicadores. Pérez-Arbelaezia. 1987;1(4-5):7-41

RUBIANO LJ. Líquenes como indicadores de contaminación en la Termoeléctrica de Zipaquirá y el Complejo Industrial de Betania, Cund. *Acta biol Colomb.* 1989;4:95-125.

RUBIANO L. J. Evaluación de habitats para la conservación de aves en el casco urbano de Santa Fe de Bogotá, Informe Técnico. Bogotá: División de Investigación DIB Sede Bogotá, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; 2001.

RUBIANO L. J. Monitoria de áreas de isocontaminación en la región de influencia de la Central Termoeléctrica Martín del Corral utilizando líquenes como bioindicadores. Pérez-Arbelaezia. 2002;13:91-104.

ToxFAQs™ para óxidos de nitrógeno. Disponible en URL: http://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts175.html. 2006.

UNIVERSIDAD NACIONAL, OFICINA DE PLANEACIÓN. Plan de regularización y manejo de la Universidad Nacional de Colombia. Bogotá: Diagnóstico 2004; 2004.

VILLAMIL CM. Diseño de una red de monitores de lluvia ácida para Bogotá, D.C., con base en un modelo conceptual del fenómeno [tesis de maestría]. Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; 2004.