

## **Emisiones biogénicas de hidrocarburos no-metano y de óxido nítrico en la Cuenca del Valle de México**

**L. G. RUIZ SUAREZ, R. LONGORIA R., F. HERNANDEZ, E. H. SEGURA,  
A. TRUJILLO, C. CONDE**

*Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM, Circuito Exterior, CU, 04510, México, D. F., México*

(Manuscrito recibido 24 de febrero, 1998; aceptado en forma final 17 de agosto 1998)

### **RESUMEN**

Se estiman las emisiones biogénicas de hidrocarburos no-metano y óxido nítrico. Se discuten los factores que pueden afectar las estimaciones hechas, así como la posibilidad de que las emisiones episódicas pueden ser mucho mayores de las estimadas para los hidrocarburos no-metano y óxido nítrico en la cuenca del Valle de México.

### **ABSTRACT**

Estimates for both biogenic emissions of non methane biogenic hydrocarbons and nitric oxide in the Valley of Mexico Basin are reported. Factors affecting the estimates and the possibility that episodic emissions may be much higher than these estimates are discussed.

**Palabras clave:** hidrocarburos, isopreno, terpeno, óxido nítrico, emisiones biogénicas, Ciudad de México.

### **1. Introducción**

La preparación de los inventarios de emisiones biogénicas (HCBNM, N<sub>2</sub>O, NO) es sumamente importante y satisface varios propósitos. La realización de esta tarea hace necesario utilizar diferentes metodologías para ello. Dentro de los objetivos a alcanzar pueden mencionarse las estimaciones anuales o de temporada (Anastasi *et al.*, 1991) por regiones o país (Modica y McCutcheon, 1991). Estos pueden ser requeridos para hacer comparaciones de emisiones antropogénicas o para calcular balances de especies químicas trazas. Otro objetivo es la obtención de perfiles de emisiones que puedan ser usados en modelos de calidad del aire (Demerjian *et al.*, 1974). Para el primer objetivo se usan valores medios horarios durante el día, radiación media, temperatura y humedad. Las estimaciones anuales podrán ser obtenidas agregando las estimaciones estacionales o de temporadas (Anastasi *et al.*, 1991). Para el segundo objetivo se requieren valores horarios de radiación, nubosidad, humedad relativa, temperatura y velocidad del viento con resolución de por lo menos una hora en cada malla del dominio que se esté modelando (Modica y McCutcheon, 1991). Ambos procedimientos son necesarios ya que el tratar

de hacer la estimación de emisiones para modelar un episodio a partir de totales estacionales implica tener que aceptar grandes errores si el episodio a modelar se aparta de las condiciones promedio ( por ejemplo días inusualmente calientes al principio de la primavera). Por otra parte, obtener estimaciones estacionales o anuales a partir de valores diarios implica un gran esfuerzo.

Por otro lado, los inventarios de óxido nítrico a partir de fuentes biogénicas involucra otra categoría; emisiones pico. Estas pueden darse bajo un conjunto de condiciones que favorezcan a los procesos de nitrificación y desnitrificación y desarrollo de poblaciones de bacterias que intervienen en estos procesos, así como aquellos de difusión de los gases a través del suelo (cultivos irrigados después de la fertilización, temporada de lluvias ). Bajo estas circunstancias las emisiones pueden ser tan grandes como 10 ó 20 veces las consideradas en los promedios anuales (Johansson *et al.*, 1988). Las estimaciones bajo estas condiciones deben considerar coeficientes de emisión específicos, los cuales estamos particularmente interesados en conocer.

Obtener un inventario de emisiones de fuentes biogénicas implica conocer la clasificación del suelo del área, el tipo de vegetación, la extensión, la densidad de vegetación y los factores de emisión, para ello se pueden usar como recursos de gran apoyo las técnicas de percepción remota y los Sistemas Geográficos de Información. En este trabajo presentamos estimaciones estacionales de emisiones de HCBNM (hidrocarburos biogénicos no-metano) y NO (óxido nítrico) en la cuenca del Valle de México. Se muestra cómo influyen la selección del dominio del área a modelar y los valores de los factores de emisión asignados en la magnitud de las estimaciones. Para los hidrocarburos biogénicos se describe un modelo preliminar basado en mediciones de temperatura, radiación solar y consideraciones básicas de la estructura del follaje. Se realizó un análisis de sensibilidad para estimar el efecto de las consideraciones asumidas.

## 2. Sección experimental

Se midieron valores de temperatura y la radiación dentro y fuera de bosques de *Quercus* y *Abies*, la selección de los sitios se hizo tomando en consideración el evitar los efectos de carreteras, edificios y cualesquiera otras estructuras que pudieran influir en las mediciones de radiación.

### 2.1 Radiación

Usualmente cuando se habla de la contaminación atmosférica en la Ciudad de México se hace la distinción de las épocas de secas y de lluvias. La mayoría de los episodios de alta contaminación (contingencias) ocurren durante el período de secas, por lo que se han dirigido grandes esfuerzos a la modelación de episodios en esta época del año. El desarrollo de nuestro modelo empírico nos llevó a reunir datos históricos de temperatura, insolación y radiación global (Mhulia, *comunicación privada*). El análisis de datos de temperaturas horarias y de radiación para los años de 1986 a 1991 nos permitió distinguir dos subgrupos de datos a los que denominamos de "*secas frías*" que comprenden los periodos de diciembre a febrero y "*secas calientes*" para los meses de noviembre, marzo y abril. Los días de *secas calientes* tienen una hora más de luz que los días de *secas frías*, la radiación global es aproximadamente 20% mayor que para los días de *secas frías* (Fig.1). Considerando una energía media por fotón equivalente a 570 nm, y que aproximadamente el 50% de la radiación global es fotosintéticamente activa, se puede observar que en las primeras horas del día se alcanza un flujo de radiación fotosintéticamente activa, medido en Einsteins, de  $800 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , tanto para las estaciones de *secas frías* como para las de *secas calientes*. Este flujo es el máximo que se usa en la ecuación de Tingey (1981), pues se considera que para flujos mayores el efecto de la radiación está saturado.

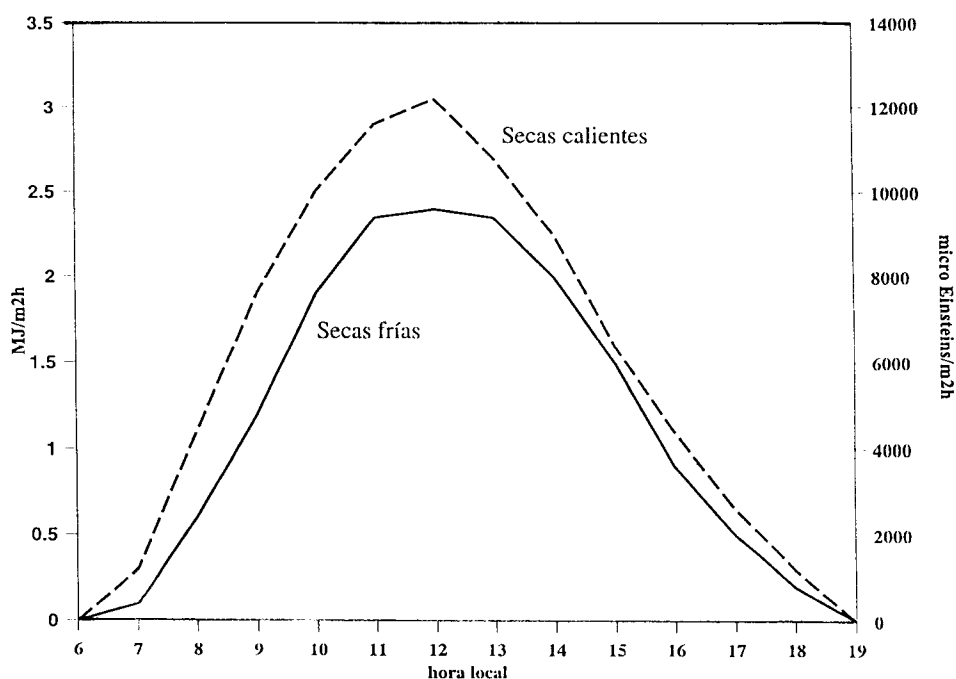


Fig. 1. Medias horarias de radiación global en temporadas de "secas calientes" y "secas frías".

Para establecer un modelo empírico que considere la atenuación de la radiación por el follaje, se realizaron mediciones de radiación utilizando un radiómetro Exotech (100BX) el cual está equipado con cuatro sensores capaces de sostener filtros de radiación, con un campo de visión de 180 grados y con una banda de amplitud iguales a la de los sensores del LANDSAT MSS o TM. Los canales A, B y C usando los filtros MSS agrupan la luz verde (500-600 nm), naranja (600-700) y roja (700-800). Las mediciones se efectuaron en dos sitios, uno con *Quercus* como especie dominante de bosque y otro con *Abies religiosa*. El primer sitio se encuentra en un campo experimental en el poblado de Tres Marías, del Edo. de Morelos a 53 km al sur de la Cd. de México. El segundo sitio se encuentra en El Ajusco, el volcán más alto de la cadena montañosa que corre del noroeste al sureste en los límites de la Cd. de México. En el primer sitio las mediciones se efectuaron en los meses de marzo y abril de 1993 (Segura Beana y Trujillo, 1993) y fueron tomadas debajo del follaje. Para simular radiaciones sobre el follaje, se hicieron mediciones en los claros cercanos. Las mediciones en el segundo sitio se llevaron a cabo en febrero. En este sitio se tuvieron rápidos y adversos cambios meteorológicos los que dificultaron las mediciones en los claros, por lo que se tomaron como equivalentes los datos obtenidos en los claros del primer sitio.

Para el primer sitio se observó gran variabilidad en los datos de radiación bajo follaje para los tres canales A, B y C, observándose picos muy grandes cuando la luz del sol impactó directamente al radiómetro a través del follaje (Fig. 2). Sin embargo, después de sumar las salidas de los tres canales, se obtiene un valor de radiación bajo el follaje de  $100 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para la mayor parte del día impactando la superficie. Lo mismo fue observado en el segundo sitio, pero con valores de radiación impactando la superficie bajo el follaje de  $400 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

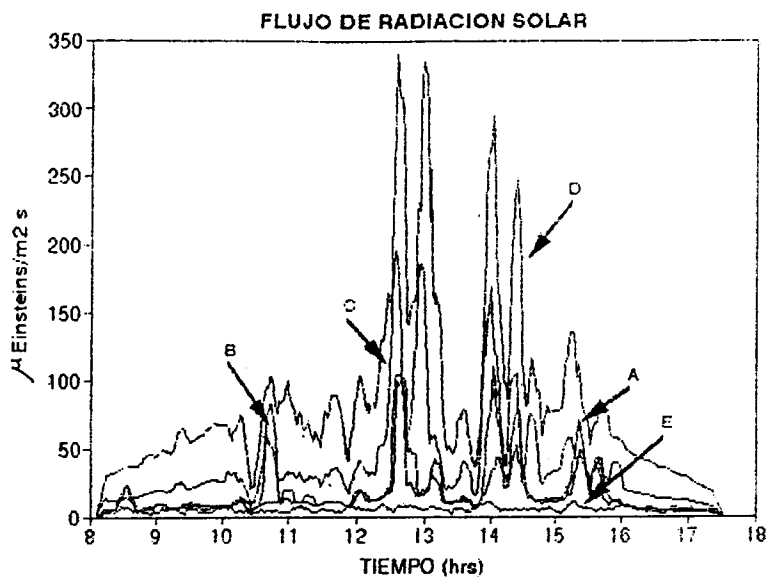


Fig. 2. Mediciones de radiación bajo un dosel de encinos. Canal A: de 500-600 nm (verde). Canal B: de 600-700 nm (naranja). Canal C: de 700-800 nm (rojo). Canal D: 295-385 (ultravioleta).

## 2.2 Temperatura

Los perfiles de temperatura para las épocas de secas-frías y secas-calientes (Fig. 3) se obtuvieron de la misma fuente mencionada anteriormente (Mhulia, *comunicación privada*), encontrándose diferencias entre las épocas fría y caliente de dos a cuatro grados centígrados, siendo sus valores medios de 13.87 y 17.6 grados centígrados respectivamente.

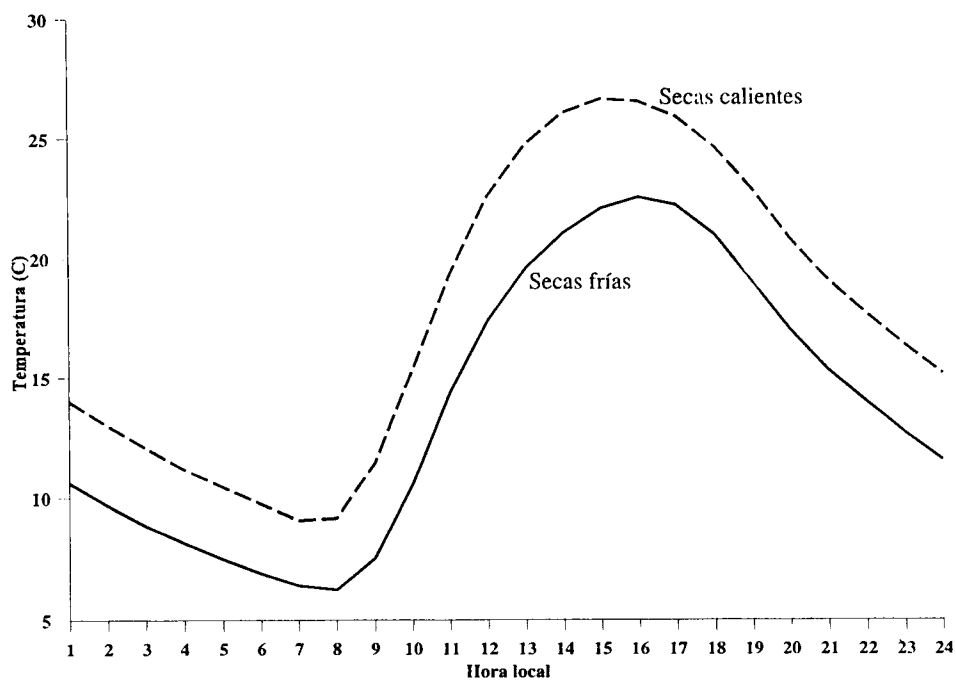


Fig. 3. Perfiles de temperatura media horaria para las temporadas de de "secas calientes" y "secas frías".

### 3. Modelo para el follaje

93

Con los resultados descritos arriba puede construirse un modelo de emisión usando un conjunto de modelos de follaje tomando como base el tipo de vegetación. Para los modelos de vegetación asumimos lo siguiente: (i) una capa compuesta de árboles con todas sus hojas expuestas a la misma temperatura, y radiación de  $800 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , (ii) una capa inferior compuesta de arbustos y pasto a la cual le llega una radiación con valor de  $400 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para bosque de coníferas y de  $100 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para bosques de árboles de hojas anchas, (iii) para pastizales y cultivos consideramos una capa que recibe la misma radiación y con la misma temperatura que la capa superior, (iv) se considera que las coníferas sólo emiten monoterpenos, los árboles de hojas anchas sólo emiten isopreno y los pastos y cultivos emiten una combinación de ambos.

### 4. Clasificación del suelo

Los segmentos de dos imágenes diferentes de Landsat TM se combinaron para cubrir la cuenca del Valle de México (Fig. 4). La imagen se extiende aproximadamente  $13 \times 10^6$  hectáreas e incluye

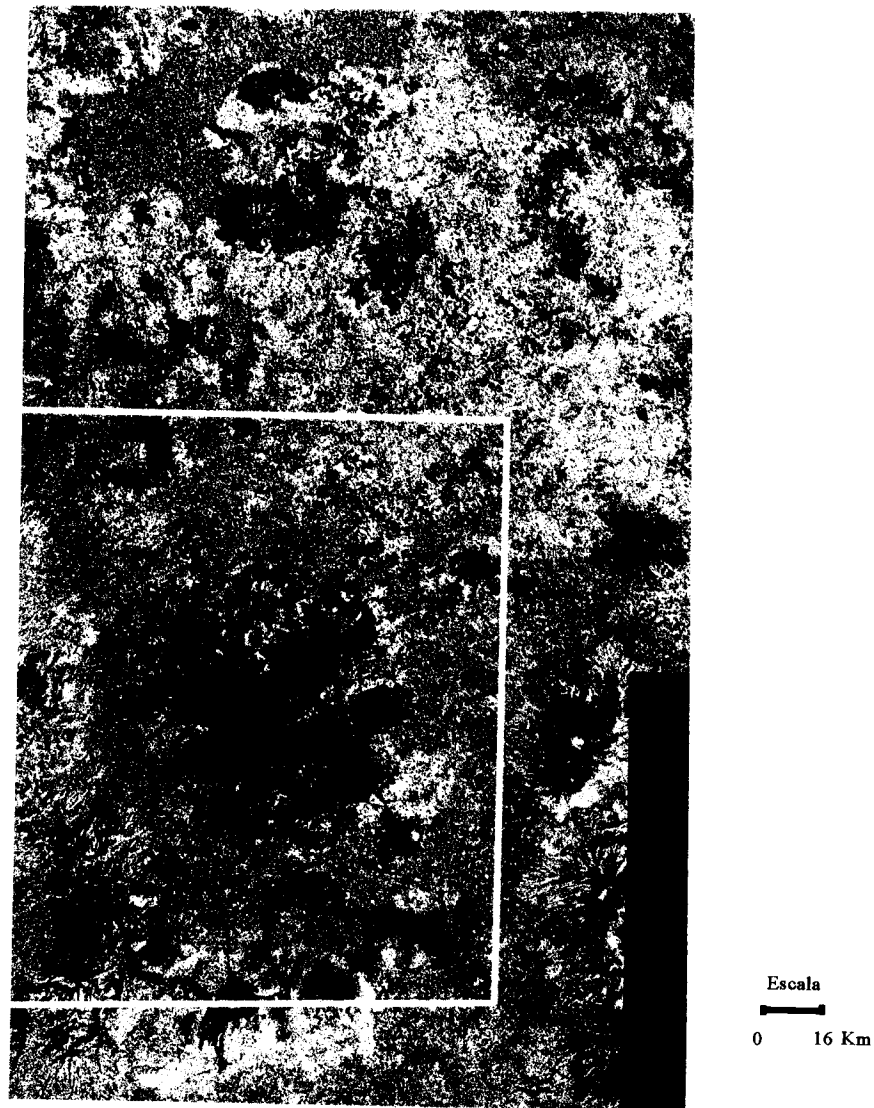


Fig. 4. Imagen de índice de vegetación (LANDSAT TM) del Valle de México mostrando el dominio de modelación actualmente en uso en algunos modelos de calidad del aire.

la ciudad de Pachuca al norte, al sur su límite es la ciudad de Cuernavaca, al este la limitan los parques nacionales Zoquiapa e Ixtapopo y al oeste la limita el parque nacional Desierto de los Leones. Se produjo una imagen compuesta de índices de vegetación con el cociente de la banda cuatro a la banda tres.

La clasificación se hizo por migración de medias, siendo este un método no supervisado, apoyándose con verificación de campo. Las categorías del uso del suelo se tomaron de INEGI (1984). La parte de la imagen dentro del marco corresponde al dominio de los modelos para calidad del aire actualmente aplicados para la Cd. de México. Los colores azul fuerte y violeta identifican bosques de oyamel y cedro y bosques de pino, respectivamente; el color verde corresponde a superficie cubierta con pastizal inducido y el amarillo a pastizal halófilo; el blanco representa bosques de pinos perturbados y cultivos.

## 5. Estimación de emisiones

### 5.1 Hidrocarburos biogénicos

Mediante el uso de la ecuación de Tingey (1981), se obtuvieron las emisiones de monoterpenos por coníferas. Siendo la ecuación usada la siguiente:

$$E = \exp(-a \cdot \exp(bT))$$

Donde:

$E$  es el factor de emisión,  $a$  y  $b$  son coeficientes adimensionales para monoterpenos y  $T$  es la temperatura.

Para las emisiones de isopreno y monoterpenos por cultivos y pastizales, las ecuaciones que se utilizaron fueron las de Modica (Modica y McCutcheon, 1991):

$$E_{adj} = E_{30} \cdot 10^{\{a/1 - \exp[-b(T-c)] - d\} / e}$$

y

$$E_{adj} = E_{30} \cdot \exp(a[T - 30])$$

Donde:

$E_{adj}$  representa el factor de emisión ajustado a una temperatura dada  $[\mu g_{isopreno} / g_{biomasa} \cdot h]$

$E_{30}$  es el factor de emisión a  $30^{\circ}\text{C}$   $\mu g_{isopreno} / g_{biomasa} \cdot h$ .

$T$  es la temperatura horaria promedio.

$a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  y  $e$  son coeficientes adimensionales para el cálculo de isopreno.

Las emisiones estimadas son linealmente dependientes de los coeficientes de emisión asumidos (logarítmicamente dependientes de la temperatura), del índice de biomasa foliar y del área asignada a cada categoría de uso de suelo.

Las emisiones se calcularon para la imagen total, la cual cubre toda la cuenca y algunas áreas bajo su influencia, así como sólo para el dominio usado por otros investigadores (Jazcilevich *et al.*, 1997). La imagen completa cubre la mayor parte del dominio del Modelo Regional de la Calidad del Aire que actualmente se desarrolla en el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la

UNAM. Las emisiones estimadas para el dominio de modelación actual (Fig. 5) y para el modelo de dominio regional son considerablemente diferentes (Tabla 1). Gran parte de la diferencia es debida a las emisiones de los bosques situados vientos abajo de la Cd. de México, observándose que para ambos dominios el 93% de las emisiones es debida a las emisiones de coníferas.

Estas estimaciones deben considerarse como valores en su límite superior, a pesar de que están considerando los límites de error más bajos de índices de biomasa de la literatura (Box, 1981). Los bosques en las áreas consideradas están bajo presión debido a la contaminación atmosférica, la tala ilegal y a la expansión demográfica. Esta presión se manifiesta en la baja densidad de ramas y en la decreciente densidad de las hojas. Esto, puede jugar un papel importante en la modificación de las velocidades de emisión que fueron tomadas de la literatura (Lamb *et al.*, 1985). Por esta razón los valores obtenidos se consideran límites superiores debido a la dificultad de incluir, con datos sustentados en campo, el grado de deterioro del follaje, y a su vez el efecto que esto tiene sobre la biomasa del sotobosque debido a la mayor disponibilidad de luz. Estos factores no pueden ser considerados homogéneos, lo que hace necesario más trabajo de campo en todo el dominio de modelación si se desea mejorar esta base de datos.

Las emisiones estimadas (Tabla 1) se obtuvieron usando temperaturas diarias medias para el período de *secas calientes*. Si se utilizan temperaturas medias horarias (Fig. 5), las emisiones pueden incrementarse, en el dominio actual de simulación, hasta 113 810 kg/día (9.4% de aumento) en un día típico de la estación de *secas frías*. Mientras que en un día típico de la estación de *secas calientes* las emisiones pueden incrementarse hasta 159 000 kg/día (15.2% de incremento). Esto último es equivalente al 6.3% de las emisiones diarias de hidrocarburos en la estación estimadas para el año 1994 (PROAIRE, 1996), aunque debe señalarse que la comparación correcta debería ser contra la fracción de olefinas en el inventario.

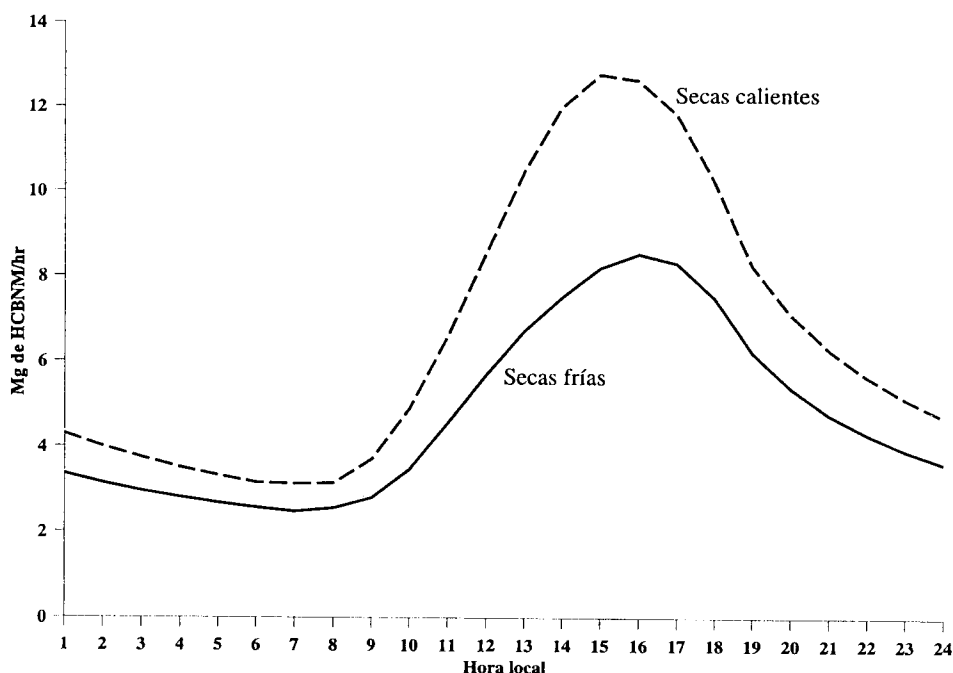


Fig. 5. Perfil de emisiones de HCBNM para el dominio actual de modelación usando temperaturas medias horarias para las temporadas de de "secas calientes" y "secas frías".

USO DEL SUELO	AREA, M <sup>2</sup> (imagen completa)	HCBNM, Kg/día	EMISIONES NO <sub>x</sub> Kg / día	AREA, M <sup>2</sup> (dominio de simulación actual)	HCBNM Kg / día	EMISIONES NO <sub>x</sub> Kg/día
Cuerpos de agua	3.985 x 10 <sup>7</sup>			2.084 x 10 <sup>7</sup>		
Urbano	6.049 x 10 <sup>8</sup>	1 745		5.539 x 10 <sup>8</sup>	1598	
Urbano baja densidad	7.064 x 10 <sup>8</sup>	2 038		3.609 x 10 <sup>8</sup>	1 041	
Cultivos	1.222 x 10 <sup>9</sup>	666	12786,21	3.466 x 10 <sup>8</sup>	189	3635,28
Cultivos inundados	1.280 x 10 <sup>8</sup>			3.749 x 10 <sup>6</sup>		
Pastizales	1.822 x 10 <sup>9</sup>	6 500	4228,92	5.169 x 10 <sup>8</sup>	1 844	1321,92
Pastizales inducidos	2.088 x 10 <sup>9</sup>	7 451		7.007 x 10 <sup>8</sup>	2 500	
Bosque de <i>Abies</i>	2.323 x 10 <sup>9</sup>	182 144	472,77	9.552 x 10 <sup>8</sup>	74 903	194,31
Bosque <i>Pinus</i>	2.123 x 10 <sup>9</sup>	106 405		9.871 x 10 <sup>8</sup>	49 602	
Bosque perturbado	1.427 x 10 <sup>9</sup>	17 721		5.648 x 10 <sup>8</sup>	7 012	
Bosque de hoja ancha	5.860 x 10 <sup>8</sup>	2 101		1.445 x 10 <sup>8</sup>	518	
Sin información	6.522 x 10 <sup>6</sup>			2.287 x 10 <sup>6</sup>		
Total	1.308 x 10 <sup>10</sup>	326 771	17487,9	5.157 x 10 <sup>9</sup>	141 208	5151,51

Tabla 1. Clasificación del uso del suelo y emisiones de HCBNM y NO como NO<sub>x</sub> para los dos dominios de simulación. Se usaron temperaturas promedio de "secas calientes", el modelo empírico de emisiones de HCBNM y el modelo de Williams *et al.* (1992) para las emisiones de óxido nítrico.

## 5.2 Óxido nítrico

Las emisiones de óxido nítrico son calculadas utilizando coeficientes medios de emisión anuales o estacionales, mediante el uso de un modelo (Williams *et al.*, 1992) y por medio de coeficientes de emisión obtenidos en eventos pico. Dependiendo de la magnitud de las estimaciones resultantes, se evalúa su importancia en los inventarios de emisiones de precursores de ozono.

En 1996 se estimaron las emisiones de óxidos de nitrógeno en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) en 128.65 Gg NO<sub>x</sub>/año. Utilizando coeficientes anuales promedio para los diferentes usos del suelo dados en la Tabla 2, se obtuvo un estimado de 22.816 Mg de NO como NO<sub>x</sub>/día (8.326 Gg/año), equivalente a 6.5% de las emisiones antropogénicas diarias estimadas en 1996.

La magnitud de las emisiones de NO provenientes de fuentes naturales pueden ser considerables según sea la influencia de las variables: humedad, temperatura y el contenido de nutrientes. El desarrollo de modelos capaces de considerar estos factores ha encontrado grandes dificultades dada la gran variabilidad de los mismos. Uno de estos modelos es el de Williams *et al.* (1992), desarrollado tomando a la temperatura como única variable y en función de un ecosistema determinado. Su ecuación es la siguiente:

$$NO(\text{ngNO} - \text{Nm}^{-2} \text{ s}^{-1}) = A \exp(0.071T_{\text{suelo}})$$

Donde  $A$  es un factor asociado al uso del suelo,  $T$  es la temperatura del suelo referida a



la temperatura ambiente según la expresión  $T_{suelo} = bT_{ambte.} + c$ , donde  $b$  y  $c$  son constantes relacionadas con el uso del suelo. La Figura 6 muestra la variación horaria de las emisiones de NO utilizando los perfiles de temperatura de un día caliente-seco dado en la Figura 3. En la Tabla 1 se agruparon las categorías de uso del suelo en sólo tres para estos cálculos: pastizales, bosques y cultivos. Las emisiones de NO utilizando el modelo de Williams fueron de 18.676 Mg de NO como NO<sub>x</sub> que equivalen a 5.3% de las emisiones antropogénicas estimadas.

Tabla 2. Emisiones de óxido nítrico (como NO<sub>x</sub>) usando factores de emisión promedio y factores de emisión episódicos para la imagen completa

USO DEL SUELO	AREA 10 <sup>9</sup> m <sup>2</sup>	F.E. ng NO-N m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	EMISIONES NOx Kg/día	Ref	F.E. ng NO-N m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	EMISIONES NOx Kg/día	Ref
Pastizales inducidos	2.09	12.00	7119.85	1	44.00	26106.13	8
Pastizales	1.82	5.70	2945.03	2	25.00	12916.80	9
Bosques de <i>Pinus</i>	4.44	2.80	3529.27	3	2.80	3529.27	3
Bosques perturbados	1.43	13.00	5277.44	4	25.00	10148.91	9
Bosques de hoja ancha	0.59	0.28	46.90				
Cultivos	1.22	6.90	2389.75	5	11.50	3982.92	6
Cultivos inundados	0.13	5.40	199.29	6	5.40	199.29	6
Urbano baja densidad	0.71	6.67	1344.40	7	6.67	1344.40	7
Cuerpos de agua	0.04						
Urbano	0.61						
Sin Información	0.60						
TOTALES	13.68		22851.92			58227.71	

1 Cárdenas *et al.*, 1993. 2 Slemer and Sailer, 1984. 3 Davidson *et al.*, 1991. 4 Anderson and Levine, 1987. 5 Galbally, 1989. 6 Williams *et al.*, 1992. 7 Johansson and Sanhueza, 1988. 8 Hutchinson and Livingston, 1993. 9 Johansson *et al.*, 1988.

Sin embargo, si se considera que los factores de emisión pueden ser mayores 20 a 100 veces con respecto a los promedios anuales o estacionales reportados en la literatura (Johansson *et al.*, 1988; Williams *et al.*, 1992), principalmente después de lluvias o de riegos de los campos de cultivos, estas emisiones episódicas pueden llegar a ser tan importantes como el 16.5% (58.187 Mg de NO/día) de las emisiones antropogénicas estimadas en el área de la figura completa.

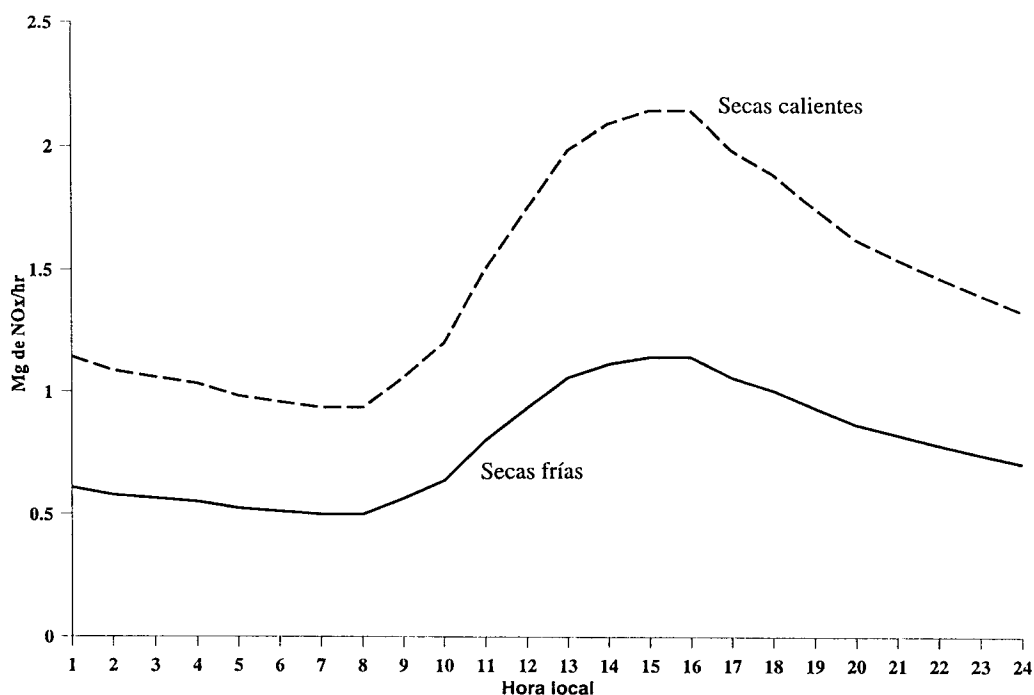


Fig. 6. Emisiones de NO como NOx a partir de la imagen completa (Fig. 3) usando temperaturas medias horarias para las temporadas de "secas calientes" y "secas frías".

## 6. Estimación de errores

Dos fuentes de error fueron identificadas en la estimación de emisiones de HCBNM: una por las consideraciones propias del modelo y otra debida a la falta de datos de temperatura sobre todo el dominio sobre el cual se aplicó el modelo de emisiones, lo cual obligó a usar datos obtenidos dentro de la ciudad. Para estimar su impacto sobre los resultados se realizó un análisis empírico de sensibilidad. Debido a la dependencia logarítmica de las emisiones con la temperatura, este es el factor al cual éstas son más sensibles. Por lo tanto, se analizó cómo los supuestos aplicados en la construcción del modelo y la cobertura de datos meteorológicos se reflejan en las emisiones a través de los valores de temperatura usados. Los nuevos estimados fueron entonces comparados contra la estimación base.

En el modelo, la consideración de sólo una capa de follaje con todas sus hojas expuestas a la misma cantidad de radiación, produce una sobreestimación de 5%. Este reducido efecto se debe a que la contribución de árboles de hoja ancha, emisores de isopreno, representa sólo una pequeña fracción del la biomasa considerada. Esto es consecuencia del acelerado proceso de cambio del uso del suelo en las partes bajas del Valle.

Debido a que dentro del follaje la temperatura es menor que la ambiente durante el día y más alta durante la noche, resulta que el considerar que en esta capa todas las hojas están a la misma temperatura y que ésta es igual a la temperatura ambiente, puede conducir a una sobreestimación durante el día y a una subestimación durante la noche. Para secas frías, la diferencia en ambos sentidos es de aproximadamente  $1.5^{\circ}\text{C}$  con referencia a la temperatura media. Por la misma razón, si se supone una misma temperatura tanto para el follaje de los árboles como para una capa debajo de él, se tendría una fuente de sobreestimación y subestimación semejante a la

anterior. Suponer que las coníferas emiten solamente terpenos y que los árboles de hojas anchas emiten sólo isoprenos puede conducir a una subestimación de 20%, aproximadamente.

Utilizar sólo datos de temperatura obtenidos en la ciudad puede originar una sobreestimación de 50% debido a que la temperatura decrece conforme uno se mueve hacia las montañas. La diferencia puede ser de hasta  $-5^{\circ}\text{C}$ . Utilizar temperaturas del ambiente en vez de temperaturas de las hojas puede producir una subestimación del 50% ya que la temperatura de las hojas durante el día puede ser  $+5^{\circ}\text{C}$  más alta. Debido al metabolismo de las plantas, la temperatura de las hojas difícilmente es menor a  $10^{\circ}\text{C}$  conduciendo a una subestimación durante la noche si se usan las temperaturas ambiente.

La mayoría de estos errores se cancelan unos con otros. Sin embargo, otra gran fuente de error es el uso de datos de la literatura para la densidad de biomasa foliar, especialmente cuando se aplica a coníferas, las cuales constituyen el 93% de las emisiones. Esta puede considerarse como una primera aproximación de la estimación de emisiones de HCBNM del Valle de México.

## 7. Conclusiones

Se presenta una evaluación del potencial de las emisiones biogénicas de HCBNM y NO de fuentes naturales. Se señala la posibilidad de que los modelos de calidad del aire que actualmente se tienen para la Cd. De México subestimen o ignoren estas fuentes naturales.

El análisis de sensibilidad para el modelo de emisiones de hidrocarburos no-metano, indica que los posibles errores introducidos por diseño o por datos usados pueden cancelarse unos con otros, así como la importancia de los datos de biomasa.

La atmósfera de la Cd. de México contiene una alta relación HC/NO<sub>x</sub> con base en átomos de carbono (PROAIRE, 1996). Debido a que la formación de ozono está limitada por los NO<sub>x</sub>, un pequeño aumento en la concentración de éstos en el aire, transportados desde los alrededores de la ciudad, especialmente de los campos de cultivo hacia el norte, podría tener un impacto considerable en la calidad del aire. Las estimaciones obtenidas son valores medios estacionales, su magnitud pone en evidencia la necesidad de incluir un módulo de emisiones biogénicas en los modelos de calidad del aire

## REFERENCIAS

- Anastasi, C., L. Hopkinson and V. J. Simpson, 1991. Natural Hydrocarbon Emission in the United Kingdom, *Atmospheric Environ*, **25A**, 1403-1408.
- Anderson, I., and J. S. Levine, 1987. Simultaneous Field Measurements of Biogenic Emissions of Nitric Oxide and Nitrous Oxide, *Geophysical Research*, **92**, 965-976.
- Box, I., 1981. *Atmospheric Biogenic Hydrocarbons*, Vol. 1, Emissions, Ann Arbor, MI.
- Cárdenas, L., A. Rondón, Ch. Johansson and E. Sanhueza, 1993. Effects of soil moisture, Temperature and Inorganic Nitrogen on Nitric Oxide Emission From Acidic Tropical Savana Soil, *Geophysical Research*, **98**, 14783-14790.
- Davidson, E. A., P. M. Vitousek, P. A. Matson, R. Riley, G. García-Martínez and J. M. Maass, 1991. Soil Emissions of Nitric Oxide in a Seasonally Dry Tropical Forest of Mexico, *Geophysical Research*, **96**, 439-445.
- Demerjian, K., J. A. Kerr, and J. G. Calvert, 1974. The mechanism of photochemical smog formation, *Advances on Environmental Science Technology*, **4**, 1-262.

- Galbally, I. E., 1989. Factors Controlling Nox Emissions From Soil in Andreae M. O. and Schimel D. S. (Eds), *Exchange of Trace Gases Between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*, John Eiley and Sons.
- Hutchinson, G. L. and G. P. Livingston, 1993. Use of Chamber Systems to Measur Trace Gas Fluxes in Agricultural Ecosystems Effects on Trace Gases and Global Climate Change, ASA Special publication number 55.
- INEGI, Carta Ciudad de México E14-2, Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250 000, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, México, 1984.
- Jazcilevich, A., V. Fuentes, E. Jáuregui y E. Luna, 1997. Modelo computacional del Clima Termal en el Valle de México, *Contaminación Atmosférica*, vol. II, Colección CBI.
- Johansson, C., H. Rodhe and E. Sanhueza, 1988. Emission of NO in a Tropical Savanna and a Cloud Forest During the Dry Season, *Geophysical Research*, **93D**, 7180-7192.
- Johansson, C. and E. Sanhueza, 1988. Emission of NO from Savana Soil During Rainy Season, *Geophysicl Research*, **93**, 14193-14198.
- Lamb, B., H. Westberg, G. Allwine, and T. Quarles, 1985. Biogenic hydrocarbons emissions from deciduous and coniferous trees in the United States, *Geophysical Research*, **90**, 2380-2390.
- Mhulia, A. *Comunicación privada*. Instituto de Geofísica. UNAM.
- Modica, L., J. R. McCutchen, 1991. Development of seasonal and annual biogenic emissions inventories for the U.S.A. and Canada, EPA-600, 17-91-006.
- PROAIRE, 1996. Departamento del Distrito Federal.
- Segura Beana, E. H. and A. Trujillo Mojica, 1993. Transferencia de radiación en follaje y cálculo de emisiones de hidrocarburos biogénicos. Bachelor Thesis. Universidad Autónoma del estado de Morelos. Cuernavaca, Morelos.
- Slemer, F. and W. Sailer, 1984. Field Measurements of NO and NO<sub>2</sub> Emissions From Fertilized Soils, *Atmospheric Chemistry*, **2**, 1-24.
- Tingey, D. T., 1981. The effect of environmental factors on the emissions of biogenic hydrocarbons from live oak and slash pine, *Atmospheric Biogenic Hydrocarbons*, Vol. 1, Emissions, Ann Arbor, MI.
- Williams, E. J., A. Guenther and F. C. Fehsenfeld, 1992. An inventory of nitric oxide emissions from soil in the United States, *Geophysical Research*, **97D**, 7511-7519.