

## 7. Fuentes naturales

Las fuentes naturales son aquellas que emiten contaminantes atmosféricos que no provienen directamente de actividades humanas. Este apartado define las categorías consideradas en estas fuentes, describe la metodología empleada, y explica las estrategias de recopilación, revisión y aseguramiento de calidad de los datos utilizados para calcular las emisiones de las fuentes naturales en el INEM. Asimismo, se resumen las emisiones estimadas por entidad federativa.

### 7.1 Categorías de fuentes

Para efectos del INEM, las fuentes naturales se definen como biogénicas o geogénicas. Las fuentes biogénicas incluyen las emisiones de COV producidas por los bosques y los cultivos, así como las emisiones de NO<sub>x</sub> provenientes del suelo. Por su parte, las fuentes geogénicas son de origen geológico: volcanes, géiseres, manantiales de aguas sulfurosas y emanaciones de aceite que suelen registrarse en ambientes mari-

nos. Otras fuentes naturales poco significativas, tales como las descargas eléctricas, no se incluyen en este inventario. Tampoco se incluyó la erosión del suelo ocasionada por el viento (tolvaneras), que en algunos casos se considera como fuente natural, debido a que se carece de datos suficientes para integrar estimaciones precisas al respecto. En el apartado 4.1 se encuentran más detalles sobre la categoría de erosión eólica.

### 7.2 Metodología para fuentes biogénicas

Los cálculos para estimar las emisiones biogénicas de COV consisten en multiplicar un factor de emisión para un tipo específico de vegetación por el área de la cobertura vegetal en el dominio del estudio. Otros factores que afectan las tasas de emisión de COV incluyen el índice de área y la temperatura foliar, así como la radiación solar al interior de la bóveda vegetal. Con el objetivo de reflejar la influencia de estos factores y

estimar en forma expedita y eficiente las emisiones de COV, se han creado numerosos modelos de computación para el cálculo de emisiones biogénicas, entre los que destacan los de la EPA. Estos modelos se elaboraron, además, para hacer estimaciones de los NO<sub>x</sub> que los suelos emiten, principalmente en forma de óxido nítrico (NO), como resultado del procesamiento microbiano natural del nitrógeno.

En el INEM, las emisiones biogénicas de COV y las emisiones de NO<sub>x</sub> provenientes del suelo se estimaron con un modelo biogénico desarrollado por la Comisión para la Calidad Ambiental de Texas (*Texas Commission on Environmental Quality*, TCEQ). Este modelo, denominado Sistema Global de Emisiones e Interacciones de la Biosfera, versión 3 (*Global Biosphere Emission and Interactions System*, GloBEIS3), se basa en modelos previos elaborados por la EPA, y es el más avanzado para la estimación de emisiones biogénicas que puede utilizarse en una computadora personal. Escrito en lenguaje Visual Basic, el GloBEIS3 opera con el programa Microsoft Access (Yarwood *et al.*, 2002) y fue el modelo que se usó en el INEM para estimar las emisiones biogénicas de isopreno (ISO), monoterpenos totales (MTT) y otras especies de COV (OCOV), así como las emisiones de NO de los suelos, generadas por la actividad microbiana. El GloBEIS permite calcular las emisiones por hora de COV y NO<sub>x</sub> para cada municipio incluido en el dominio del inventario. El cuadro 7-1 lista las especies de COV cuyas emisiones se estimaron con este modelo.

### 7.2.1 Recopilación de datos

Para usar el GloBEIS es preciso integrar tres conjuntos de datos: definición de dominio, meteorológicos y de uso del suelo. A continuación se describen los procesos de recopilación de la información e integración de los tres conjuntos de datos. Otra información necesaria para aplicar el modelo GloBEIS incluye el huso horario, la hora y día de inicio y de fin, y el año base (1999). Además se conservaron sin modificación dos opciones por omisión del modelo GloBEIS: el número de capas de bóveda (cinco capas) y el factor de emisión para el isopreno.

CUADRO 7-1. ASIGNACIONES A MONOTERPENOS TOTALES (MTT) Y OTRAS ESPECIES DE COV (OCOV) EN EL GLOBEIS3

ESPECIES DE MONOTERPENOS ASIGNADAS A MTT	OTRAS ESPECIES DE COV ASIGNADAS A OCOV
α-pineno	metanol
β-pineno	etanol
δ3-careno	acetona
sabineno	butanona
δ-limoneno	etano
β-felandreno	acetato hexenilo
ρ-cimeno	etano
micreno	hexenal
canfeno	hexenol
canfor	acetaldehído
acetato de bornilo	propeno
α-tujeno	butano
terpinoleno	formaldehído
α-terpineno	hexanal
γ-terpineno	ácido acético
ocimeno	ácido fórmico
1,8-cineol	
piperitona	

#### *Definición de dominio*

Esta información permite establecer los atributos espaciales generales necesarios para aplicar el GloBEIS en cada municipio. En particular, se recopilaron los siguientes datos de entrada para cada municipio:

- Código del estado
- Código del municipio
- Coordenadas de latitud y longitud
- Superficie en kilómetros cuadrados (km<sup>2</sup>)

Uno de los problemas detectados al formular el conjunto de datos para la definición de dominio se debió a la incorporación de varios municipios nuevos. Es decir, algunos de los datos proporcionados para el uso del suelo se obtuvieron a partir de información que incluía menos municipios y no concordaba con un archivo de municipios más reciente, basado en tecnología SIG. A efecto de resolver este problema, la información sobre uso del suelo se mapeó con base en el archivo de municipios más reciente de formato SIG.

### *Datos meteorológicos*

El modelo GloBEIS permite que el usuario capture datos meteorológicos opcionales, por ejemplo, velocidad del viento, humedad, datos históricos de temperatura e índice de sequía. Estos datos de entrada se utilizan fundamentalmente con fines de investigación, pero a menudo el acceso a los mismos es difícil. Además, hoy por hoy no resulta clara la manera de interpretar las estimaciones de emisiones obtenidas con estos datos opcionales (Estes, 2002), es por ello que se decidió no utilizarlos en el INEM. Por lo tanto, la información meteorológica recopilada para el inventario abarca únicamente la cobertura de nubes y la temperatura, ambas por hora.

Los datos relativos a la cobertura de nubes se expresan como la fracción de cielo despejado, o bien, aquella fracción cubierta con nubes. Por ejemplo, a un día totalmente despejado correspondería una fracción de cobertura de nubes de 0.00 (0 por ciento), en

tanto que un periodo de nubosidad densa tendría una fracción de 1.00 (100 por ciento). Esta información se obtuvo directamente del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2003). De las 147 estaciones meteorológicas incluidas en el conjunto de datos del SMN, sólo 40 por ciento contaba con valores por hora para la cobertura de nubes durante todo el año, es decir, 60 por ciento de los sitios carecía de datos sobre la cobertura de nubes por hora. A cada municipio se le asignaron los datos de la estación meteorológica más próxima, sin importar si se ubicaba dentro de sus límites territoriales, para lo cual se sobrepuso la distribución de las estaciones meteorológicas mexicanas en un mapa de municipios. La figura 7-1 muestra las estaciones meteorológicas que aportaron información sobre la cobertura de nubes por hora.

Alrededor de 90 por ciento de los valores de temperatura por hora obtenidos directamente del SMN estuvieron incompletos, no incluyeron los datos de temperatura para cada hora y, en muchos casos, care-

FIGURA 7-1. UBICACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN MÉXICO CON DATOS SOBRE COBERTURA DE NUBES CADA HORA



cieron de los datos de varios días. El Centro Nacional de Datos Climáticos de Estados Unidos (*National Climatic Data Center*, NCDC) compila y publica datos de temperatura por hora para las estaciones climatológicas mexicanas (NCDC, 2003) a partir de la información que el SMN recaba y le proporciona. La base de datos del NCDC contiene las temperaturas por hora correspondientes a un total de 116 estaciones en México. Para llenar los vacíos en el conjunto original de datos obtenido directamente del SMN se utilizaron los valores de temperatura por hora del NCDC; a su vez, las lagunas de información en los datos del NCDC se subsanaron con nuevos datos de temperatura por hora integrados a partir de perfiles de cambio de temperatura para las estaciones en lo individual. Al igual que con la cobertura de nubes, a cada municipio se le asignaron los datos correspondientes de temperatura con base en la proximidad de las estaciones meteorológicas, trasladando para ello las estaciones meteorológicas del país sobre un mapa de municipios. A los

municipios que no cuentan dentro de su territorio con una estación, se les asignó la estación más cercana.

La figura 7-2 muestra las estaciones meteorológicas que aportaron datos sobre temperatura por hora. Es importante señalar que las estaciones meteorológicas con datos sobre cobertura de nubes, no necesariamente corresponden a aquellas que proporcionaron información sobre temperatura. En el apéndice F se encuentra una lista de las estaciones que proporcionaron datos sobre temperatura o cobertura de nubes.

#### *Datos de uso de suelo*

Al igual que con los datos meteorológicos, el modelo GloBEIS permite al usuario introducir una variedad de datos opcionales sobre la vegetación (por ejemplo, número de capas de bóveda, índice de área foliar, edad y temperatura foliar). Sin embargo, muchos de estos datos no están fácilmente disponibles en el ámbito nacional y, más aún, existe poca claridad acerca de cómo

FIGURA 7-2. UBICACIÓN DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS EN MÉXICO CON DATOS DE TEMPERATURA POR HORA



interpretar las estimaciones de emisiones derivadas de los mismos (Estes, 2002). Por ello, estos datos opcionales no se utilizaron para el INEM.

A partir de información del Inventario Nacional Forestal de México 2000-2001 (UNAM, 2002) se integró un conjunto de datos de uso de suelo, que fueron proporcionados en archivos de formato SIG con la ubicación y cuantificación de distintas especies forestales.

Desafortunadamente, tales archivos no correspondieron a los archivos por estado o por municipio, de manera que fue necesario alinear cada estado para que concordara con los datos de límites municipales asociados a las definiciones de dominio. Debe observarse que la alineación del conjunto de datos no es perfecta; es decir, aún persisten algunos vacíos de información que, sin embargo, no se consideran significativos. Las especies forestales se mapearon con base en los factores de emisión del GloBEIS. En los casos de especies para las que no fue posible el mapeo con especies específicas o similares en el GloBEIS se las clasificó como “bosque mixto”. El mapa de la figura 7-3 muestra el conjunto de datos de usos de suelo que finalmente se integró para este proyecto.

No fue posible disponer de información sobre prácticas agrícolas similar a la obtenida para las actividades forestales. Las estadísticas agrícolas se obtuvieron de la SAGARPA (SAGARPA 2003a), y se trata de datos que determinan los tipos de cultivo sembrados a escala estatal, e incluyen las extensiones (número de hectáreas) dedicadas a más de 300 cultivos diferentes. Estos cultivos se mapearon en lo individual con base en los factores de emisión disponibles en el modelo GloBEIS. A cada municipio se le aplicaron los correspondientes datos de escala estatal. En algunos casos, la información sobre cultivos de la SAGARPA resultó más específica que los factores de emisión disponibles. Los tipos de cultivo para los que no fue posible el mapeo con especies específicas o similares en el GloBEIS se clasificaron como “cultivos misceláneos”. Sin embargo, en algunos casos, los cultivos para los que no se contaba con factores de emisión específicos resultaban ser de los más comunes en un estado. Así ocurrió, por ejemplo, con el frijol, en cuyo caso se optó por mapearlo con el cacahuate para refinar las esti-

maciones de las emisiones de COV, dado que tanto el frijol como el cacahuate pertenecen a la familia *Fabaceae*; asimismo, tomate y chile se mapearon con base en indicadores de emisión del tabaco, puesto que los tres cultivos pertenecen a la familia *Solanaceae*. Los resultados de estas asignaciones concordaron con los niveles de emisión esperados para estos cultivos (Geron, 2003).

El cuadro 7-2 resume los resultados de los datos de uso de suelo recopilados, en términos del total de km<sup>2</sup> de tierras agrícolas, forestales y de otros tipos en cada estado.

### 7.2.2 Cálculo de emisiones

Todos los archivos de entrada de datos se compilaron en el formato requerido por el modelo GloBEIS. Los detalles respecto de este modelo y el formato de los archivos de alimentación se presentan en el volumen VII, *Desarrollo de inventarios de emisiones de fuentes naturales*, de la serie de manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México (ERG, 2002a). Se corrió el modelo GloBEIS por lotes, para cada estado. Los resultados se recopilaron en cuadros de datos de Access de Microsoft, después se revisaron para asegurar la calidad y generar los cuadros de resumen finales.

### 7.2.3 Aseguramiento de calidad

A lo largo del proceso de integración del inventario de fuentes de área, y de acuerdo con el plan de aseguramiento de calidad (PAC) contenido en el *Plan para la preparación del INEM* (ERG, 2003a), se realizaron diversas revisiones de aseguramiento de calidad, a saber:

- Se revisó la integridad y exactitud de los datos recopilados para alimentar el modelo GloBEIS para cada municipio (área total cubierta, coordenadas de latitud y longitud del centroide), tipo de superficie y cobertura de la vegetación. También se comprobó la precisión de los códigos asignados. En el caso del tipo de superficie y cobertura de la vegetación, los códigos se mapearon directamente con los factores de emisión de NO<sub>x</sub> y COV. También se

CUADRO 7-2. SUPERFICIE CORRESPONDIENTE A CADA USO DE SUELO, POR ESTADO

ENTIDAD FEDERATIVA	SUPERFICIE POR USO DE SUELO (KM <sup>2</sup> )			
	FORESTAL	AGRÍCOLA	OTROS	TOTAL
Aguascalientes	1,186.5	2,077.1	2,358.1	5,621.7
Baja California	1,653.1	313.3	71,244.3	73,210.8
Baja California Sur	3,946.8	6,991.1	61,267.4	72,205.3
Campeche	34,574.6	4,163.5	7,126.1	45,864.2
Coahuila	5,482.2	19,152.7	126,349.1	150,983.9
Colima	2,852.8	2,012.6	753.6	5,619.0
Chiapas	39,726.4	11,996.8	22,211.2	73,934.4
Chihuahua	74,010.9	35,006.6	137,437.1	246,454.7
Distrito Federal	799.1	490.8	215.9	1,505.8
Durango	60,400.2	13,218.8	49,765.1	123,384.2
Estado de México	6,814.9	9,904.0	4,900.6	21,619.5
Guanajuato	3,967.7	14,414.5	12,033.3	30,415.6
Guerrero	41,396.4	10,911.5	11,463.9	63,771.9
Hidalgo	4,733.1	10,704.8	5,548.2	20,986.1
Jalisco	34,486.9	21,737.6	22,851.7	79,076.2
Michoacán	30,026.1	17,109.7	11,609.9	58,745.7
Morelos	2,042.9	2,153.1	658.6	4,854.6
Nayarit	15,863.1	5,865.8	6,219.3	27,948.3
Nuevo León	4,968.7	10,728.9	48,941.5	64,639.1
Oaxaca	60,115.9	15,052.9	16,955.3	92,124.1
Puebla	11,900.7	15,672.9	6,562.6	34,136.2
Querétaro	3,069.2	4,409.1	4,098.2	11,576.5
Quintana Roo	33,826.1	1,937.5	7,733.6	43,497.2
San Luis Potosí	7,771.1	14,955.6	38,779.0	61,505.7
Sinaloa	23,848.0	21,141.8	11,100.9	56,090.7
Sonora	31,205.4	15,260.9	135,206.0	181,672.4
Tabasco	6,486.7	2,812.3	15,305.0	24,604.0
Tamaulipas	14,073.4	14,442.0	49,464.2	77,979.5
Tlaxcala	544.8	3,068.1	384.6	3,997.5
Veracruz	12,254.9	20,941.5	37,449.5	70,645.9
Yucatán	19,391.3	8,736.7	11,334.1	39,462.1
Zacatecas	14,851.6	19,510.8	41,609.2	75,971.6
<b>Total</b>	<b>608,271.8</b>	<b>356,895.1</b>	<b>978,937.3</b>	<b>1,944,104.2</b>

verificó que los datos de temperatura y cobertura de nubes extrapolados para cada municipio fueran razonables.

- El modelo GloBEIS incluye también un módulo de aseguramiento de calidad (módulo AC), que verifica que los datos de entrada sean consistentes entre sí. Por ejemplo, el módulo AC comprueba

que se cuente con datos para cada código de uso de suelo y verifica que existan datos de nubosidad y temperatura para cada celda (municipio) y hora. Este módulo se utilizó para garantizar la integridad del archivo de datos de entrada.

- El paso final de aseguramiento de calidad consistió en revisar cuidadosamente los informes de

resumen del GloBEIS para verificar que los resultados correspondieran con los tipos de uso del suelo. Por ejemplo, se esperaría que un municipio registrado con el código de uso de suelo “urbano” tuviera emisiones de  $\text{NO}_x$  inferiores que las de otro municipio con uso de suelo agrícola.

Todos los errores encontrados durante las revisiones de aseguramiento de calidad se corrigieron para proseguir con los pasos subsecuentes del modelo GloBEIS y estimar las emisiones de fuentes naturales para el INEM.

### 7.3 Metodología para fuentes geogénicas

Aunque las fuentes de emisión geogénicas comprenden todas aquellas de origen geológico (volcanes, filtraciones

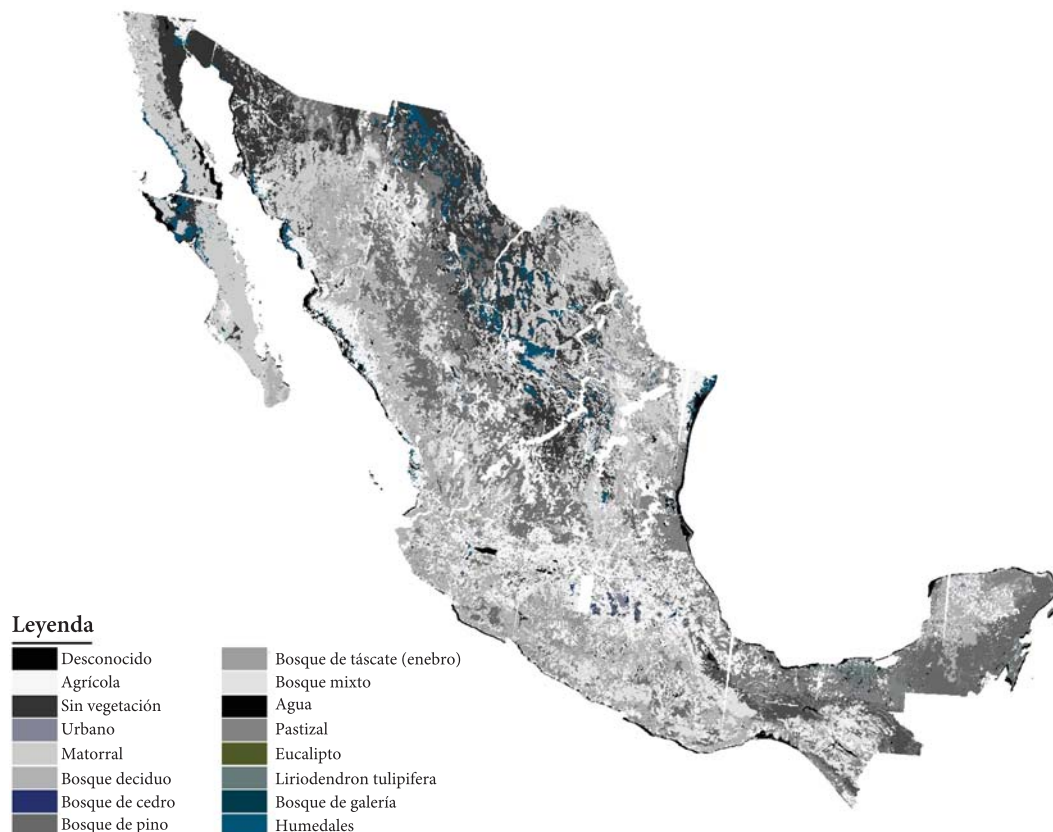
de aceite, géiseres y manantiales de aguas sulfurosas), el INEM sólo incluye volcanes, ya que en la actualidad se dispone de muy pocas investigaciones que permitan cuantificar con precisión las emisiones del resto de las fuentes geogénicas, o bien se trata de fuentes cuyas emisiones no se consideran significativas. Los volcanes emiten una variedad de contaminantes, entre otros:  $\text{SO}_2$ , PM, ácido clorhídrico y ácido sulfhídrico. Para el INEM se estimaron las emisiones de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$ .

Hay cuatro volcanes principales en México:

- Colima, Jalisco
- El Chichón, Chiapas
- Parícutín, Michoacán
- Popocatépetl, Puebla

Sólo el Colima y el Popocatépetl estuvieron activos durante 1999.

FIGURA 7-3. CONJUNTO DE DATOS DE USO DE SUELO INTEGRADO PARA EL INEM



### 7.3.1 Recopilación de datos

Los satélites del Espectrómetro Cartográfico del Ozono Total (*Total Ozone Mapping Spectrometer*, TOMS) registran las actividades de erupciones volcánicas que llegan a la estratosfera. Sin embargo, las actividades de erupción registradas en el Colima y el Popocatepetl durante 1999 fueron todas de bajo nivel, y sólo alcanzaron una altitud de 4 a 5 kilómetros; por consiguiente, no se observaron o registraron emisiones de SO<sub>2</sub> de ninguno de los dos volcanes a través de detección remota satelital (Carn, 2004) y, puesto que no se dispuso de datos satelitales para tales erupciones, fue necesario obtener mediciones de la actividad volcánica en cada sitio.

Los datos de emisión de SO<sub>2</sub> para el volcán Colima se obtuvieron del Informe Semanal de Actividad Volcánica (*Weekly Volcanic Activity Report*, WVAR), proyecto de cooperación entre el Programa Mundial de Vulcanismo del Museo Nacional de Historia Natural del Instituto Smithsonian y el programa Riesgos de la Actividad Volcánica (*Volcano Hazards*) del U.S. Geological Survey. Se consultaron los informes archivados correspondientes a la actividad volcánica en 1999 (WVAR, 2002). El cuadro 7-3 presenta las di-

versas mediciones de SO<sub>2</sub> realizadas, así como los valores promedio derivados de ellas. (No se dispuso de información sobre PM).

Las emisiones anuales de SO<sub>2</sub> correspondientes al Popocatepetl se obtuvieron de estimaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México (Delgado Granados, 2001). Los datos sobre PM provinieron del inventario BRAVO que contiene un registro promedio diario de emisiones de PM y ha calculado una relación PM-SO<sub>2</sub> de 7.5 a 1 (Kuhns *et al.*, 2003). Asimismo, las razones aplicadas para determinar la distribución de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> (10 y 2 por ciento, respectivamente) se tomaron de otras investigaciones pertinentes sobre volcanes mexicanos (Galindo *et al.*, 1998; Kuhns *et al.*, 2003).

### 7.3.2 Cálculo de emisiones

Las emisiones anuales de SO<sub>2</sub> del volcán Colima se calcularon multiplicando las emisiones diarias promedio por 365 días: 2,014 Mg/día × 365 días/año = 735,000 Mg/año. Para calcular las emisiones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> se usaron la relación PM-SO<sub>2</sub> y las razones de distribución de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> del Popocatepetl como sigue:

CUADRO 7-3. MEDICIONES DE EMISIONES DE SO<sub>2</sub> DEL VOLCÁN COLIMA

FECHA	MG DE SO <sub>2</sub> AL DÍA				VELOCIDAD PROMEDIO DEL VIENTO (M/S)
	PROMEDIO	MAX	MIN	INCERTIDUMBRE (±)	
02/03/99	4,530	5,290	3,206	1,043	7.71
02/14/99	2,377	2,610	2,030	293	10.3
02/17/99	1,256	1,657	853	402	8.5
02/20/99	1,710	2,410	948	732	5.01
02/22/99	2,319	ND	ND	350	ND
03/04/99	4,764	5,408	4,087	661	15.1
03/11/99	2,760	3,642	2,184	729	15.2
03/26/99	1,432	2,030	943	543	8.6
03/31/99	1,214	1,520	917	301	10
04/14/99	1,044	1,406	674	366	7.7
05/04/99	352	377	326	25	10.2
05/15/99	406	483	361	61	5.1
Promedio	2,014	2,439	1,503	459	9

ND = Dato no disponible

- $PM_{10} = 1,871,440 \text{ Mg (SO}_2) \times 7.5 \times 0.1$   
= 1,403,580 Mg
- $PM_{2.5} = 1,871,440 \text{ Mg (SO}_2) \times 9.5 \times 0.02$   
= 280,716 Mg

Por su parte, las emisiones anuales de  $SO_2$  del Popocatepetl se tomaron directamente de la referencia de la UNAM (Delgado Granados, 2001).

Se reconoce que estas estimaciones de emisiones anuales son muy inciertas, y fueron desarrolladas usando información limitada. Como tal, deberían ser vistas sólo como aproximaciones de las emisiones actuales.

### 7.3.3 Aseguramiento de calidad

Para asegurar un cálculo correcto de las emisiones volcánicas, se solicitó a un científico de primer rango desvinculado del proceso de estimación que revisara los datos en bruto y los cálculos. No se detectó problema alguno.

## 7.4 Resultados por entidad federativa

El cuadro 7-4 presenta los resultados del inventario de emisiones de fuentes naturales por estado. Las estimaciones de emisiones de  $NO_x$  muestran una estrecha correlación con las actividades agrícolas de cada entidad, lo cual es razonable toda vez que la mayoría de las emisiones biogénicas de  $NO_x$  se asocian con el uso de fertilizantes. Así, por ejemplo, el estado de Sinaloa registra intensa actividad agrícola, como lo indica su elevado porcentaje de tierras de uso agrícola en comparación con otros estados; así, aunque se trata de un estado relativamente pequeño en términos geográficos, es la cuarta entidad con mayores emisiones biogénicas de  $NO_x$ . Asimismo, Tamaulipas y Jalisco figuran con las emisiones más elevadas de  $NO_x$ , lo que refleja la importancia de la actividad agrícola en ambas entidades. En contraste, la actividad agrícola en el Distrito Federal comparativamente reducida y las emisiones biogénicas de  $NO_x$  producidas por los suelos en dicha entidad son también relativamente bajas.

Estos resultados presentan emisiones considerables de COV para los estados con mayor cobertura forestal, por ejemplo, Chihuahua, Oaxaca y Durango. Además, las emisiones de COV son en general proporcionales al tamaño del estado, de manera que las entidades con mayor extensión territorial (como Chihuahua) tienen las emisiones más elevadas de COV. Los detalles sobre los tipos de uso de suelo y las superficies en cada estado se pueden encontrar en el cuadro 7-2.

Todas las emisiones geogénicas de  $SO_x$  y PM fueron generadas por los dos volcanes mexicanos activos durante 1999: el Popocatepetl (localizado en el estado de Puebla) y el Colima (localizado en el estado de Jalisco).

### 7.4.1 Limitaciones en la información

El modelo GloBEIS es una herramienta eficiente para estimar las emisiones biogénicas y permite al usuario mucha flexibilidad en cuanto a los tipos de datos empleados para su estimación. En el caso del INEM, ciertas limitaciones en la información afectaron los tipos de datos con los que se alimentó el modelo GloBEIS, así como los resultados generados:

- La primera limitación en la información de entrada se relaciona con la estacionalidad de los datos sobre cultivos. Si bien el GloBEIS permite al usuario definir coberturas de cultivos por hora a lo largo del año, el hecho es que no se cuenta con tal nivel de resolución temporal para los cultivos en México; de manera que, para simplificar el proceso, se asumió una cobertura de cultivos anual. Por ello es muy probable que las emisiones de  $NO_x$  de los suelos estén sobreestimadas.
- La segunda limitación en la información se relaciona con la forma en que se llenaron los vacíos en los datos de cobertura de nubes y temperatura. Se integraron promedios de nubosidad que presupusieron un mayor número de días despejados (valor de 0), de manera que las emisiones de COV serían mayores debido a una mayor fotosíntesis. Asimismo, es posible que los cambios en los índices de temperatura utilizados sean más elevados que los

CUADRO 7-4. EMISIONES DE FUENTES NATURALES EN MÉXICO EN 1999, POR ESTADO

ENTIDAD FEDERATIVA	EMISIONES ANUALES (MG/AÑO)				
	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub> <sup>a</sup>	COV	PM <sub>10</sub> <sup>a</sup>	PM <sub>2,5</sub> <sup>a</sup>
Aguascalientes	6,710.9		23,703.0		
Baja California	4,452.8		18,644.6		
Baja California Sur	31,046.5		268,954.2		
Campeche	21,058.1		985,542.3		
Coahuila	62,081.1		376,073.7		
Colima	2,348.4		82,740.8		
Chiapas	42,470.2		1,196,504.6		
Chihuahua	51,705.5		1,926,593.9		
Distrito Federal	988.8		13,865.7		
Durango	27,593.7		1,379,099.1		
Estado de México	25,001.5		92,280.6		
Guanajuato	43,739.9		96,632.4		
Guerrero	40,706.4		1,297,720.7		
Hidalgo	25,137.8		161,446.8		
Jalisco	68,952.5	735,110.0	993,571.7	551,333.0	110,267.0
Michoacán	51,888.1		670,208.3		
Morelos	6,196.7		43,251.4		
Nayarit	11,796.3		464,105.1		
Nuevo León	39,016.4		265,494.1		
Oaxaca	43,951.4		2,053,153.1		
Puebla	42,981.4	1,871,440.0	210,429.5	1,403,580.0	280,716.0
Querétaro	14,778.4		84,248.0		
Quintana Roo	11,666.4		900,259.1		
San Luis Potosí	35,717.6		259,688.8		
Sinaloa	60,311.4		766,573.8		
Sonora	56,601.9		788,088.4		
Tabasco	8,424.7		164,650.9		
Tamaulipas	79,399.9		466,344.3		
Tlaxcala	7,410.4		8,832.9		
Veracruz	51,233.9		441,634.0		
Yucatán	17,553.1		608,910.7		
Zacatecas	25,691.1		334,655.9		
<b>Total</b>	<b>1,018,613.2</b>	<b>2,606,550.0</b>	<b>17,443,902.4</b>	<b>1,954,913.0</b>	<b>390,983.0</b>

<sup>a</sup>Las emisiones de fuentes naturales de SO<sub>x</sub> y PM se generaron en su totalidad a partir de dos volcanes (Colima y Popocatépetl), que fueron los únicos dos volcanes activos en México durante 1999.

cambios reales. Ambas limitaciones se traducirían en emisiones estimadas por arriba de las emisiones reales.

- La tercera limitación en la información se relaciona con el conjunto de datos sobre el uso del suelo empleado (UNAM, 2002). Es probable que las áreas urbanas en México abarquen en realidad una mayor extensión que la registrada en el conjunto de datos del modelo. Las tierras urbanas se asocian con una disminución en las actividades forestales. Asimismo, en algunos casos los códigos de uso del suelo indicaron vegetación mixta con ciertos tipos de bosques; sin embargo, se desconocían tanto las especies que en realidad conformaban la vegetación mixta (arbustos y matorrales cuyas emisiones de COV son menores que las de algunas especies arbóreas), como la proporción de su crecimiento en relación con las correspondientes especies forestales; por consiguiente, resultó necesario usar sólo las especies forestales al alimentar los datos correspondientes a dichos suelos de vegetación mixta. Ambas limitaciones —posible subestimación de áreas urbanas y sobrestimación de especies forestales— provocarían que las emisiones estimadas de COV fueran superiores a las emisiones reales.

A medida que se logre disponer de mayor información meteorológica (por ejemplo, datos de temperatura por hora), será posible actualizar el inventario de fuentes naturales de emisión. Asimismo en el futuro, a fin de integrar un inventario de emisiones más completo, deberán revisarse los factores de emisión de áreas boscosas y agregarse nuevos factores de emisión para especies actualmente no consideradas en el GloBEIS. Por último, cabe señalar que a escala municipal se requiere de datos agrícolas más abundantes que permitan cuantificar los cultivos que se producen, así como sus ciclos productivos. En la actualidad sólo se dispone de datos estatales sobre el número de hectáreas por cultivo.

Por lo que respecta a las emisiones volcánicas, son extremadamente variables y pueden presentar alzas o bajas considerables en periodos relativamente cortos. Además, las emisiones  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  del volcán Colima se basaron en mediciones realizadas en el Popocatepetl y pueden o no reflejar las fracciones de partículas gruesas y finas que realmente se derivan de sus emisiones. Así, las emisiones volcánicas de  $SO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  calculadas en este apartado deben considerarse en general como meras aproximaciones de las emisiones reales.

