

MEMORIA

TERCER COLOQUIO BINACIONAL
MÉXICO-JAPÓN SOBRE GESTIÓN AMBIENTAL:
MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE

MÉXICO
28-29 DE NOVIEMBRE DE 1996



Agencia de Cooperación
Internacional del Japón

CENICA

Centro Nacional de Investigación
y Capacitación Ambiental
MÉXICO-JAPÓN



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, RECURSOS NATURALES Y PESCA

Julia Carabias Lillo
Secretaria

Gabriel Quadri de la Torre
Presidente del Instituto Nacional de Ecología

Adrián Fernández Bremauntz
Director General de Gestión e Información Ambiental

**TERCER COLOQUIO BINACIONAL MÉXICO-JAPÓN
SOBRE GESTIÓN AMBIENTAL:**

MODELOS DE CALIDAD DEL AIRE

MEMORIA

COMITÉ ORGANIZADOR

**INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA
AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DEL JAPÓN
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y CAPACITACIÓN AMBIENTAL**

ÍNDICE

Palabras de bienvenida al Tercer Coloquio <i>Adrián Fernández Bremauntz</i>	1
Modelo de isla de calor, modelo de regresión de dos fases autocorrelacionado <i>Masashi Ito</i>	3
Meteorología en cuencas elevadas <i>Graciela B. Raga</i>	9
Calidad del aire en el Área Metropolitana de la Ciudad de México <i>Víctor Hugo Páramo Figueroa</i>	17
Sistemas de información geográfico SICORI/PEMEX <i>Carlos Ruiz de Velasco, Armando Madera Sosa, Oscar López Castillo y Carmen Reyes Guerrero</i>	25
Herramientas computacionales para el pronóstico de la calidad del aire <i>Raúl Rivera Palacios</i>	33
Método de pronóstico para el esmog fotoquímico <i>Toshimasa Oohara</i>	41
Sistema de información geográfica para modelos atmosféricos SIGMA <i>Francisco Zamora</i>	49
Química de las atmósferas urbanas <i>Ma. Esther G. Ruiz S., Elba Ortiz</i>	55
Modelos de emisión de óxidos de nitrógeno en Japón. Simulación de óxidos de nitrógeno <i>Mitsuhiro Yamamoto</i>	63
Modelo integral de la calidad del aire <i>Kurt Fedra, Rina Aguirre</i>	75
Aplicación y limitaciones de los modelos de calidad ambiental <i>Rina Aguirre</i>	83

PALABRAS DE BIENVENIDA AL TERCER COLOQUIO

*Adrián Fernández Bremauntz
Dirección General de Gestión e Información ambiental
Instituto Nacional de Ecología*

Buenos días tengan todos ustedes:

Sr. Ken Kinoshita, Director General de JICA en México; Sr. Yutaka Hozono líder del proyecto CENICA por la parte japonesa; Dr. Javier Tejeda, Director para el CENICA; y Dr. Rubén Varela; distinguidos asistentes: Quisiera a nombre de la Maestra Julia Carabias y a nombre muy especialmente del Ing. Gabriel Quadri de la Torre darles la más cordial de las bienvenidas al Instituto Nacional de Ecología.

Es para mí un honor y un gusto el poderlos recibir y compartir con ustedes este evento que es ya el tercero de una serie de coloquios que el CENICA ha venido organizando en los últimos dos años. Como ustedes saben el proyecto CENICA tiene por objeto la creación de un centro nacional de investigación y capacitación en temas ambientales, este centro lleva varios años en planeación y con muchísimo gusto hemos visto a nuestros colegas japoneses y nosotros mismos que está ya dando muestras que es una realidad. En este aspecto la Universidad Autónoma Metropolitana aceptó hace tiempo amablemente ser socio en este proyecto y las obras para la construcción del CENICA se han iniciado.

Yo quisiera agradecer y felicitar a todos los participantes como ponentes y especialmente al Sr. Toshimasa Oohara quien ha hecho un esfuerzo muy especial, ya que ha tenido que viajar desde Japón para estar con nosotros.

Este tipo de evento es muy importante para el Instituto Nacional de Ecología, porque si bien nosotros mismos no somos una institución que se dedica fundamentalmente a la investigación también tenemos la responsabilidad de tomar decisiones, de establecer políticas ambientales, si es nuestro objetivo el que la información técnico-científica mejore, la que esté a la mano, la que esté disponible sea la materia prima con la cual se tomen las decisiones. Me da mucho gusto ver en la audiencia a varias de las personas o personalidades que más han aportado a la investigación en estos temas ambientales de contamina-

ción del aire en México: les puedo asegurar que este tipo de eventos, que son de corte fundamentalmente científico-técnico, se van a repetir cada vez más; pero lo más importante y en la línea de lo que mencionaba hace un momento vamos a tratar de que la información que se va compartiendo, generando; que se va buscando; sea utilizada de la mejor manera posible para la toma de decisiones, ya que necesitamos tomar cada vez mejores decisiones, decisiones informadas, basadas no en aspectos políticos, no mucho en aspectos económicos y mucho en aspectos técnico-científico; necesitamos en primer lugar conocer qué es lo mejor para el ambiente y en base a eso y a ver qué tanto campo de maniobra o que posibilidades hay de la aplicación de medidas.

No quisiera extenderme más y mejor dejar paso a los trabajos, les deseo que este simposio sea de lo mas productivo. Quiero también agradecer muy especialmente a nuestros compañeros de la Universidad Metropolitana, al Dr. Rubén Varela y al grupo de investigadores que con él han venido trabajando porque este coloquio que aquí en el INE se realiza en esta ocasión tuvimos la fortuna de ligarlo tanto en tiempo como en contenido con un evento que se llevo a cabo en los últimos dos días en la Universidad Metropolitana, en ese evento se atacaron fundamentalmente los aspectos mas duros, mas profundos del modelaje de la contaminación atmosférica; en este caso, si bien seguimos en la línea del rigor científico, ya estaremos revisando algunos aspectos de la aplicación de este conocimiento a la toma de decisiones y al establecimiento de políticas ambientales.

Les deseo el mejor de los éxitos y muchas gracias por estar aquí.

MODELO DE ISLA DE CALOR: MODELO DE REGRESIÓN DE DOS FASES AUTOCORRELACIONADO

Masashi Ito
Departamento del Distrito Federal
Secretaría del Medio Ambiente

Introducción

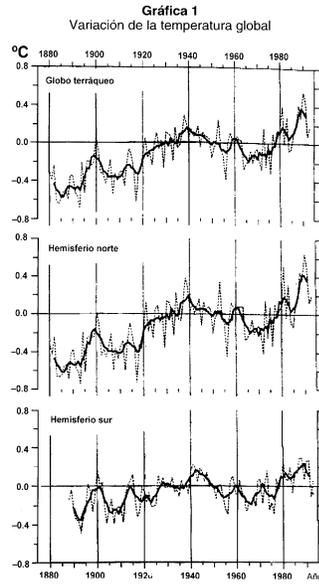
El calentamiento global de la Tierra es un problema actual reconocido. De acuerdo con un análisis detallado de las observaciones de temperatura en todo el mundo, la temperatura promedio ha aumentado 0.5 °C durante los últimos 100 años.

En la gráfica 1 se presenta la variación de la temperatura en el hemisferio norte y sur, y el valor promedio a nivel mundial desde 1880 a 1980. En esta gráfica es posible observar un incremento continuo a partir de 1970, el cual se atribuye a fenómenos naturales como: la actividad volcánica, manchas solares y el fenómeno del Niño, además del efecto de fuentes antropogénicas que emiten gases invernadero como: bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y clorofluorocarbonos (CFCs).

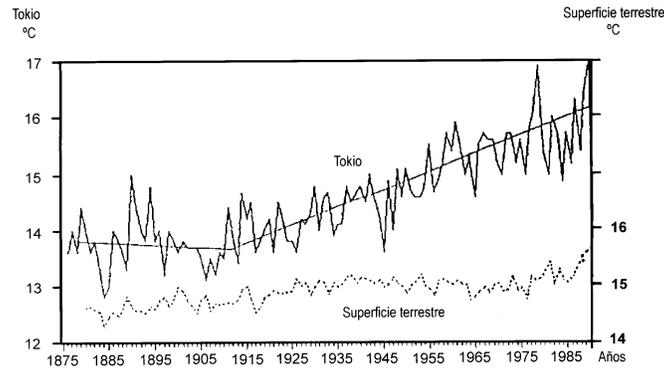
Además del efecto de calentamiento global, es importante analizar el efecto de isla de calor, que se presenta en las grandes zonas urbanas.

El concepto de isla de calor comenzó a utilizarse durante la Revolución Industrial, en la ciudad de Londres, Inglaterra, cuando se detectaron puntos en el centro de la ciudad con temperaturas considerablemente mayores que en los suburbios. Esta diferencia se comprobó en otras ciudades de la época.

En la gráfica 2 se presenta la variación de la temperatura promedio, de 1875 a 1985, para la ciudad de Tokio; y la media terrestre, pudiendo observar que a partir de 1905 el incremento de la temperatura urbana es más rápido que el aumento en la media terrestre, lo cual está directamente relacionado con el crecimiento de la ciudad (superficie de la



Gráfica 2
Temperatura promedio anual en Tokio y la superficie terrestre



mancha urbana) más que con el efecto del calentamiento global. En esta gráfica, observamos que la temperatura de Tokio aumentó 2.5 °C durante los últimos 100 años, esto es, cinco veces más que el calentamiento global del planeta.

Dos factores principales son los considerados como causantes de la isla de calor: la liberación de energía resultante de las actividades del ser humano (transporte, iluminación, servicios, etc.), uso de materiales que absorben energía solar (cemento, asbesto, etc.) y la construcción de edificios que impiden la circulación libre del viento. En el centro de Tokio, se estima que el calor perdido por radiación durante la noche en los suburbios es equivalente a 100W/m².

Durante el invierno, en ciudades donde se requiere calefacción, el efecto de la isla de calor es mucho más notorio.

En zonas urbanas en las cuales existen pocas áreas verdes (tierra, árboles, vegetación y cuerpos

de agua), la evaporación es mínima y el efecto de isla de calor se agudiza.

De lo anterior se desprende la importancia de separar, para el análisis del calentamiento global de la Tierra, los datos correspondientes al efecto de la isla de calor en las grandes ciudades. Para realizar esta separación, antes de procesar los datos de temperaturas medias, se comparan los datos de zonas urbanas contra los datos correspondientes a zonas suburbanas y rurales, filtrando los primeros empleando técnicas de eliminación de ruido.

Sin embargo, en este caso se pretende establecer un mecanismo para la estimación del aumento de temperatura en zonas urbanas, por lo cual los efectos conjuntos de isla de calor y calentamiento global deberán ser considerados.

Modelo de regresión de dos fases

Considerando que la temperatura de las ciudades tiende a aumentar a partir de un punto fijo, se

considera adecuado aplicar un modelo de regresión de dos fases en vez de uno de regresión normal. El análisis de regresión para una variable independiente del tiempo, no es adecuado para cuando esta variable muestra un cambio puntual de tendencia.

A continuación se describe la forma adecuada de aplicar un modelo de regresión de dos fases, en el cual los errores que se presentan pueden ser autocorrelacionados, y posteriormente se presenta, a manera de ejemplo, el mecanismo para seleccionar el modelo de regresión y la distribución asintótica de los parámetros que se manejan.

La descripción detallada del modelo de dos fases, junto con su desarrollo, puede consultarse en Noda e Ito (1993), en donde además se establecen las condiciones de estabilidad del método. Baste aquí saber que el método de regresión normal establece una relación única entre las variables X y Y .

$$Y = \beta X + u$$

mientras que en la regresión en dos fases la matriz de trabajo tiene la siguiente forma:

$$X = \begin{bmatrix} X_1 & 0 \\ 0 & X_2 \end{bmatrix}$$

Para resolver el sistema de ecuaciones resultante se empleó el método de Cochrane-Orcutt (1949), pero una vez planteadas las matrices descriptivas, cualquier método de solución resultaría adecuado.

Al resolver estas ecuaciones es posible comprobar que los parámetros que se manejan son asintóticamente independientes, por lo que es posible tratar el modelo resultante como un modelo de regresión normal.

Modelo de variación de temperatura para Tokio

Aplicando el método de regresión de dos fases autocorrelacionadas para el procesamiento de los datos a la temperatura de Tokio, es posible obtener un modelo de variación para esta zona.

Los datos empleados para este ejemplo corresponden a las temperaturas medias mensuales de las

estaciones urbanas de Tokio, de 1876 a 1990, y el modelo de variación de la temperatura estará dado por las siguientes ecuaciones:

para $i = 1, 2, \dots, 122$

$$Y = 13.64 - 0.0018 (X_i - 122.52)$$

y para $i = 123, \dots, 459$

$$Y = 13.64 + 0.0068 (X_i - 122.52)$$

en donde Y es la temperatura y X_i el año correspondiente.

La gráfica 3 muestra los valores empleados para desarrollar este modelo y la línea recta resultado de la regresión. El punto de inflexión se observa que ocurre en 1906 y que, antes de este año, la temperatura tenía una tendencia descendente. El punto de inflexión se relaciona directamente con el inicio de actividades de la industria pesada japonesa

A partir de 1906 hasta 1990, la temperatura comenzó a aumentar, estimándose una razón de incremento de 2.72 °C por cada 100 años. Esto es, la isla de calor de Tokio va en aumento.

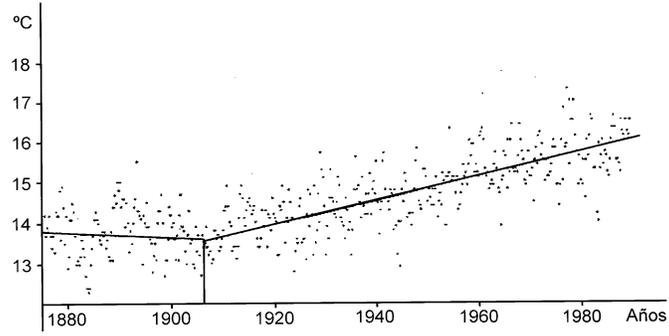
Ejemplos

Siguiendo el procedimiento del caso anterior, se emplearon los datos de temperatura media mensual de Osaka (gráfica 4), encontrando que para esa ciudad el punto de inflexión se observa en 1929 y que la tendencia de crecimiento después de ese año es menor que para la ciudad de Tokio.

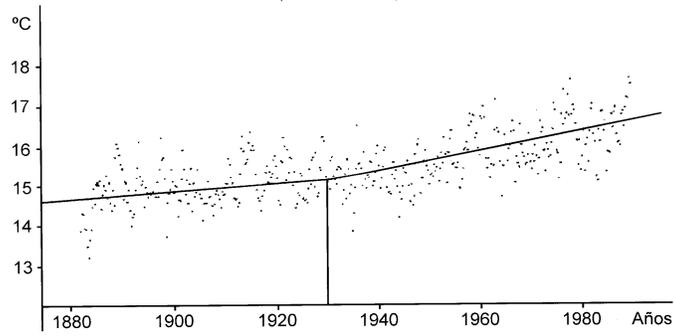
Recordando que el efecto de la isla de calor se manifiesta, entre otras formas, por el aumento de la temperatura mínima diaria observada, se repitió el método de regresión en dos fases para la obtención de un modelo de variación de la temperatura mínima diaria, empleando los promedios anuales de ésta, para conocer el comportamiento de las dos zonas urbanas arriba mencionadas, Tokio y Osaka.

Al procesar la información disponible es posible observar que en ambas ciudades, gráfica 5 y 6 respectivamente, existe una tendencia positiva a lo largo de todo el periodo de estudio. Sin embargo,

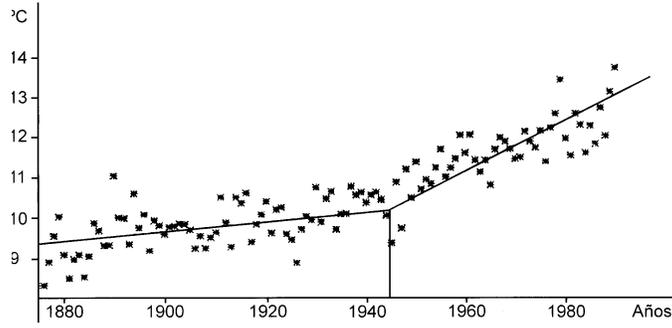
Gráfica 3
Temperatura de las estaciones en Tokio
(1876-1990 n = 459)



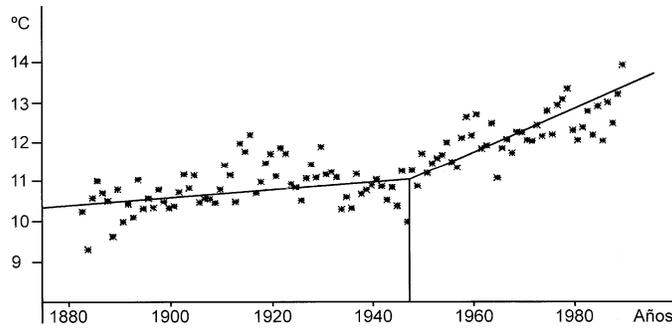
Gráfica 4
Temperatura de las estaciones en Osaka
(1883-1990 n = 431)



Gráfica 5
Temperatura mínima diaria promedio anual en Tokio
(1876-1990 n = 115)



Gráfica 6
Temperatura mínima diaria promedio anual en Osaka
(1883-1990 n = 108)



a partir de 1945 se observa una pendiente más pronunciada, lo cual coincide claramente con el fin de la Segunda Guerra Mundial y el crecimiento acelerado de las ciudades japonesas.

Referencias

- 1.- Billingsley, P. (1961). The Lndeberg-Levy theorem for martingales, *Proc. Amer. Math. Soc.*, **12**, 788-792
- 2.- Cochrane, D. and Orcutt, G.H. (1949). Application of Least-squares Regressions to Relationships Containing Auto-correlated Error Terms;
- 3.- Feder, P. I (1975). On Asymptotic Distribution Theory in Segmented Regression Problems-Identified Case; *The Annals of Statistics* **3**, 1, 49-836
- 4.- Feller, W. (1966). *Introduction to Probability Theory and its Aplication*, Vol. 2, John Wiley, New York
- 5.- Hansen, J. et al (1993). *Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies: three-dimensional model*; *J.Geophysics. Res.*, **93**, 9341-9364.
- 6.- Hinkley, D. V. (1969). Inference about the intersecion in two-phase regression; *Biometrika*, **56**, 495-504
- 7.- Itoh, M., Noda, K., Shinada, Y. and Tachibana, N. (1983). A model selection approach to the two-phase regression estimation and the human sensibility analysis in urban ecosystem; *Behavormetrica*, **13**, 1-18
- 8.- Kimura, F. and Takahashi S. (1991). The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo Metropolitan area; A numerical experiment. *Atmos. Environ.*, **25B**, 155-164. *J. Am. Statist. Assoc.* Vol. 44, 32-615
- 9.- Krishnaiar, P.R. and Rao, C.R. (1988). Review about Estimation of Change Points; Handbook of Statistics, Elsevier Science Publishers B.V. Vol. 7, 375-402
- 10.- Noda, K., Itoh, M (1993). On Stability of Two-Phase Regression Model Selection, *SUT J. of Math.* **29**, 113-141
- 11.- Shaban, S.A. (1980). Change point problem and two-phase regression; *International Statistical Review* **48**, 83-93

METEOROLOGÍA EN CUENCAS ELEVADAS

Graciela B. Raga
Centro de Ciencias de la Atmósfera
Universidad Nacional Autónoma de México

Introducción

Durante esta conferencia, se describirán los procesos físicos más importantes en el desarrollo de circulaciones de mesoescala relacionadas con condiciones topográficas de valle-montaña y de cuencas elevadas. Se hará una reseña de los estudios realizados en cuencas elevadas, presentándose observaciones de las circulaciones en cuencas elevadas en latitudes medias. Asimismo, se discutirán resultados de simulaciones numéricas.

Finalmente, se mencionarán las diferencias más significativas que se encuentran entre cuencas en latitudes medias y en los trópicos, presentándose observaciones y resultados de simulaciones numéricas para el caso de la Cuenca de México.

En esta reseña se presentan en primer término, los procesos físicos importantes en la determinación de las circulaciones de vientos observadas en cuencas elevadas. Tales procesos pueden ser ocasionados por forzamientos mecánico o térmico.

a) Forzamiento mecánico

En este caso se hace referencia a las circulaciones generadas por la interacción del viento fuera de la cuenca con la topografía. Dos circulaciones frecuentemente observadas están asociadas a ondas de sotavento y a vórtices de estela.

b) Forzamiento térmico

El balance de energía y radiación en superficie constituye la condición de frontera para el volumen de atmósfera por encima de la misma y es a través de esta superficie que la atmósfera se calienta o se enfría principalmente. Podemos definir la radiación neta (Q_n) como la suma de la radiación solar neta (Q_s) y la de onda larga neta (Q_{ol}):

$$Q_n = Q_s + Q_{ol} = Q_{tr} - Q_c - Q_a$$

donde Q_{tr} corresponde a los flujos turbulentos de calor sensible y latente en superficie, Q_c , es el término de conducción en superficie y Q_a es el calor debido a fuentes antropogénicas.

Las observaciones indican que el término de radiación neta (Q_n) es positivo y de magnitud grande durante el día y es negativo de magnitud pequeña durante la noche. Esto sugiere que en un dado momento no existe un balance radiativo. Un déficit o un exceso en el balance radiativo debe ser compensado por flujos de energía de fuentes radiativas, es decir los flujos de calor sensible y latente y por conducción. Durante el día un exceso de energía radiante puede ser usada para calentar la superficie, la atmósfera adyacente o para evaporar agua. Un déficit de energía radiante durante la noche puede ser balanceado por un flujo de calor hacia arriba desde la tierra, por calor antropogénico, por un flujo hacia abajo desde la atmósfera o por condensación de agua sobre la superficie. La ecuación sólo indica que la suma de todos los términos debe ser cero, pero no da ninguna información acerca de si hay un cambio en uno de los términos, cómo se dividirá entre los términos restantes. Hay varios factores que pueden afectar el balance de energía, en particular las diferencias espaciales tales como contrastes de agua y tierra; contrastes entre áreas urbanas y rurales; topografía elevada; gradientes en el contenido de humedad del suelo; contrastes en albedo de superficie y vegetación, y variaciones en nubosidad.

Observaciones y simulaciones en latitudes medias

Whiteman (1990) presenta una extensa discusión sobre observaciones en valles de montaña en latitudes medias, que se resumirá brevemente en esta sección, para después generalizar a situaciones de cuencas

elevadas. En particular, presenta una hipótesis para el rompimiento de la inversión térmica desarrollada cerca de la superficie durante la noche (figura 1). Antes del amanecer, una inversión de temperatura profunda ocupa todo el valle. Después del amanecer, la radiación solar que reciben el piso del valle y las laderas se convierte en flujo de calor sensible. Este flujo causa el desarrollo de una capa límite convectiva en las regiones adyacentes a la superficie. Se produce la incorporación de masa a la capa convectiva del núcleo estable ubicado por encima, y esa masa es transportada por el flujo ladera arriba. Tanto la base como los lados de núcleo estable pierden masa y se produce un descenso hacia el piso del valle. Este descenso da como resultado un calenta-

miento adiabático, que reduce la estabilidad en ese núcleo estable. La subsidencia en la atmósfera estable del valle es un mecanismo muy efectivo para transportar la energía recibida en las laderas y el piso del valle y redistribuirla en toda la atmósfera del valle. En cuencas elevadas, la subsidencia no es tan importante porque el flujo ladera arriba es una fracción pequeña del volumen total de la atmósfera en la cuenca.

En la figura 2 se presenta la evolución de la estructura térmica y de viento típica en el centro del valle durante el transcurso de un día. Se pueden observar cuatro regímenes distintos:

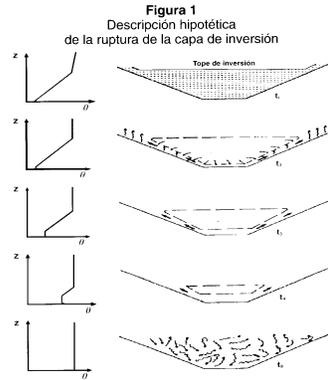


Figura 1. El lado derecho del diagrama muestra secciones del valle en los tiempos t_1 , t_2 , t_3 y t_4 . El lado izquierdo corresponde a los perfiles de potencial de temperatura tomados desde el Centro del Valle. Antes del amanecer (t_1) una inversión está presente en el valle. Después del amanecer (t_2) el piso del valle y las laderas reciben radiación solar, ésta desarrolla una capa límite convectiva (CLC) que cubre la superficie del valle. La masa se incorpora a la capa convectiva del núcleo estable y es transportada por el flujo ladera arriba dando como resultado un descenso estable del núcleo y el desarrollo de los CLC (t_3 - t_4) hasta que la inversión se rompe (t_4).

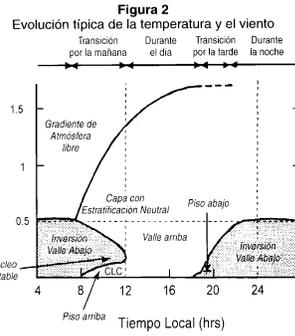


Figura 2. Evolución típica diurna de temperatura (negritas) y estructura de las capas de vientos (italicas) a 500 m de profundidad del valle.

- i) *durante la noche*: generalmente hay una inversión de temperatura con una altura comparable a la altura del valle. Durante este período hay vientos ladera abajo y también valle abajo. El flujo en el valle está desacoplado del flujo por arriba del mismo.
- ii) *transición de la mañana*: al amanecer, empieza a formarse una capa límite convectiva. Por encima del valle, también se desarrolla una capa

límite convectiva con estratificación neutra. En el valle, el crecimiento de la capa límite convectiva no es muy rápido porque la capa debe crecer hacia arriba donde se encuentran los remanentes de la fuerte inversión nocturna. Asimismo, la tasa de crecimiento está reducida por la subsidencia mencionada anteriormente. Hacia el mediodía, la atmósfera del valle se encuentra bien mezclada.

iii) *durante el día*: la convección tiene lugar en todo el valle, piso, laderas y cumbres. Los vientos generados térmicamente se dirigen ladera y valle arriba, y pueden cambiar de dirección con la altura para alinearse con el viento por arriba del valle. El viento en el valle se convierte en turbulento y "arrachado" y es importante caracterizarlo si se quiere estudiar dispersión de contaminantes.

iv) *transición de la tarde*: este período comienza cuando se produce el enfriamiento de las superficies que ya no reciben radiación solar directa. Se inician entonces los flujos ladera abajo y valle abajo. Una vez generados estos flujos, la inversión de temperatura en el valle crece hasta ocupar todo el valle. Los movimientos de ascenso en el centro del valle contribuyen a enfriar la atmósfera de todo el valle.

Teniendo en cuenta las características térmicas y dinámicas observadas en valles, presentamos ahora observaciones obtenidas en cuencas elevadas en latitudes medias. Banta y Cotton (1981) presentan observaciones obtenidas en la cuenca de South Park en Colorado Estados Unidos (EU), como lo muestra la figura 3. Las observaciones con globo cautivo permitieron identificar ciertas características generales de la evolución diurna, que se describen en la figura 4. En el panel A antes del amanecer, se observa mucha estabilidad y un flujo ladera abajo, representado por la letra D. Este flujo tiene una dirección un poco distinta del de la capa más arriba, que corresponde a un flujo de viento gradiente. El panel B después del amanecer, muestra ya una pequeña capa convectiva y un cambio en la dirección del viento en niveles bajos de 180°. En el panel C, se observa un flujo ladera arriba bien desarrollado, pero todavía desacoplado del flujo más arriba. En el último panel se observa la máxima extensión de la capa límite convectiva y un flujo acoplado



Figura 3. Regiones por debajo de los 2744 m son representadas por rayas, regiones por encima de los 3409 presentan un ligero sombreado y las regiones por arriba de 3659 m presentan un sombreado intenso. La base del sitio indicada por estrellas fue localizada en un terreno en declive cerca de las altas montañas del oeste. Los triángulos representan dos de los sitios de monitoreo y los círculos muestran la ubicación de las estaciones PAM. Las seis estaciones centrales del "SOUTH PARK" son incluidas dentro del rectángulo.

desde la superficie hasta el tope de la capa. Este acoplamiento se produce por el transporte vertical de momento desde las crestas hacia abajo, hasta llegar a la superficie.

En el trabajo de Kondo *et al.* (1989) se presentan también observaciones en una cuenca elevada en Japón (figura 5). Las características térmicas son similares a las descritas anteriormente y aquí vale la pena mencionar las observaciones realizadas para determinar el balance energético en superficie (figura 6). Durante la noche el flujo de radiación neta es casi compensado por la suma del flujo de calor sensible y el calor desde el interior. El flujo de calor latente es muy pequeño. En cambio durante el día, el término de radiación (370 W/m^2) es compensado en gran parte por los flujos de calor sensible y latente, resultando en un calentamiento neto de 220 W/m^2 .

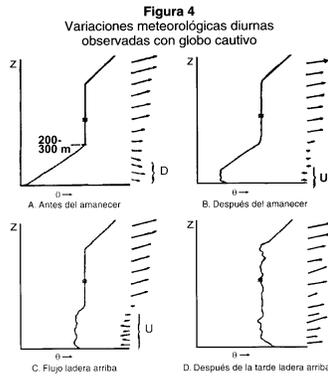


Figura 4. Características de la evolución diurna, a) Inversión nocturna con flujo migratorio (D) formándose (b) un pequeño CLC con una incipiente capa ascendente (u), (c) la intensidad y CLC continua hasta el último remanente de la inversión nocturna d) el rompimiento de la capa neutral nos indica que ésta es mucho más profunda que la representada y discutida en el texto.

Whiteman *et al.* (1996) presentan observaciones nocturnas en una cuenca muy cerrada en Colorado (EU), mientras que Fast *et al.* (1996) presentan los resultados de las simulaciones numéricas de ese caso, que permite estudiar en detalle los flujos nocturnos y el balance de calor en superficie. Se realizaron dos experimentos numéricos, con y sin viento promedio. En general el modelo predice correctamente la evolución del perfil vertical de temperatura potencial, pero se observan discrepancias en los primeros 100 metros, donde se observa un enfriamiento mayor que el modelado (figura 7). Los autores sugieren que esa diferencia se debe a que la resolución en la vertical es insuficiente o que hay demasiada mezcla vertical cerca de la superficie. Los resultados del experimento sin viento promedio por encima de los 300 metros se asemejan más a los perfiles observados, y el mayor enfriamiento se produce en los primeros 500 metros.

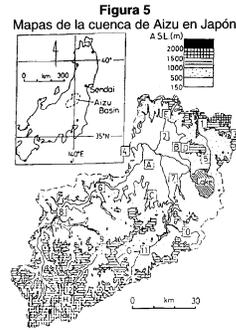


Figura 5. Las letras A-H indican los sitios de observación, los números del 1-12 indican las estaciones AMDBAS. Los círculos localizados en el mapa en el lado superior izquierdo indican las estaciones aerológicas.

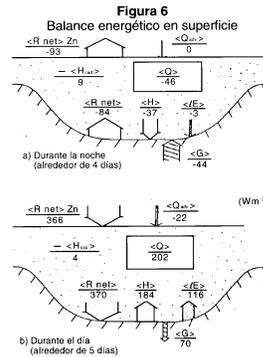


Figura 6. Balance energético en superficie en unidades Wm^{-2}
a) Durante la noche (alrededor de 4 días), b) Durante el día (alrededor de 5 días).

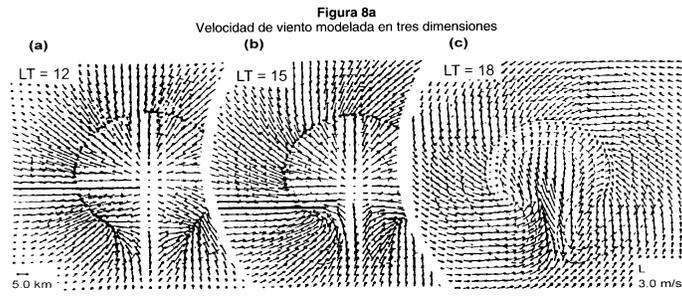
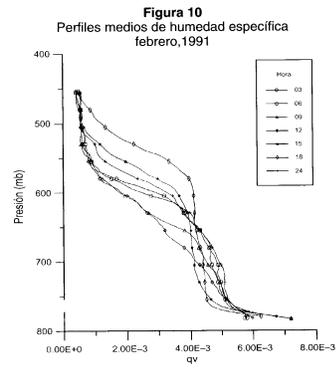
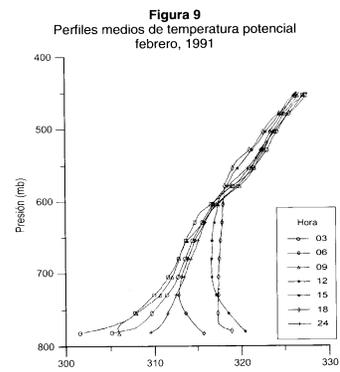


Figura 8a. Vector de velocidad de vientos por encima de los 10 m de la superficie terrestre. Calculado por un modelo tridimensional en diferentes tiempos: a) 1 200 Lt, b) 1 500 Lt, y c) 1 800 Lt, con intervalos de 5 km cada figura muestra sólo la parte de interés. La separación de líneas son contornos de elevación con 300 m de intervalo.

tal, que abarca la mitad oeste de la cuenca, donde se encuentra ubicada predominantemente la zona urbana. Es importante resaltar que estos resultados son consistentes con el análisis de datos de ozono y

dióxido de azufre en superficie por Raga y LeMoyné (1996), donde se plantea una hipótesis de circulación vortical para explicar la distribución de los mencionados contaminantes.



Conclusiones

En esta presentación se expusieron las características principales de las circulaciones de vientos originadas por forzamiento mecánico y térmico. Se presentó la evolución temporal típica en valles (que han sido más estudiados en el pasado), así como las características observadas en algunas cuencas elevadas. Se detallaron algunas diferencias importantes entre valles y cuencas en latitudes medias. Se presentó por primera vez la evolución temporal de los perfiles termodinámicos para el caso de la Cuenca de México, derivados de los datos obtenidos durante el Estudio Global de la Calidad del Aire, en Febrero de 1991.

Bibliografía

- Banta, R. and Cotton, W.R. (1981) An analysis of the structure of local wind systems in a broad mountain basin. *J. Applied Meteor.*, **20**, 1255-1266.
- Bossert, J.E. (1997) An investigation of flow regimes affecting the Mexico City region. *J. Applied Meteor.*, in press.
- EGCA (1995) Estudio Global de la Calidad del Aire en la Ciudad de México. Informe conjunto del Instituto Mexicano del Petróleo y el Laboratorio Nacional de Los Alamos. IMP/LA-12699.
- Fast, J. D., Zhong, S. and Whiteman, C. D. (1996) Boundary layer evolution within a canyonland basin. Part II: Numerical simulations of nocturnal flows and heat budgets. *J. Applied Meteor.*, December, in press.
- Kimura, F. and Kuwagata, T. (1993) Thermally induced wind passing from plain to basin over a mountain range. *J. Applied Meteor.*, **32**, 1538-1547.
- Kondo, J., Kuwagata, T. and Haginoya, S. (1989) Heat budget analysis of nocturnal cooling and daytime heating in a basin. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 2917-2933.
- Raga, G. B. and LeMoyné, L. (1996) On the nature of air pollution dynamics in Mexico City I. Nonlinear analysis. *Atmos. Environ.*, **30**, 3987-3993.
- Whiteman, C. D. (1990) Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. *Meteorological Monographs*, **23**, 5-42. American.
- Whiteman, C. D., McKee, T. B. and Doran, J. C. (1996) Boundary layer evolution within a canyonland basin. Part I: Mass, heat and moisture budgets from observations. *J. Applied Meteor.*, December, in press.

CALIDAD DEL AIRE EN EL ÁREA METROPOLITANA DE LA CIUDAD DE MÉXICO

*Victor Hugo Páramo Figueroa
Director de Administración de la Calidad del Aire
Instituto Nacional de Ecología*

Bajo este título analizaremos dos aspectos relacionados con la calidad del aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

1. Datos Históricos Sobre la Calidad del Aire en la Ciudad de México
2. Elementos del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México 1995-2000

En nuestro país se cuenta con normas de calidad del aire, para siete especies contaminantes consideradas como parámetros criterio.

Los valores de estas normas se presentan en la tabla 1 y se comparan contra su equivalente en los Estados Unidos.

Tabla 1
Tabla comparativa de calidad del aire

contaminante	México		Estados Unidos	
	unidades	periodo	unidades	periodo
O ₃	0.11 ppm	1 hr	0.12 ppm	1 hr
SO ₂	0.13 ppm	24 hrs	0.14 ppm	24 hrs
	0.03 ppm	promedio aritmético anual	0.03 ppm	promedio aritmético anual
NO ₂	0.21 ppm	1 hr	0.25 ppm	1 hora
			0.053 ppm	promedio aritmético anual
CO	11 ppm	8 hrs	9 ppm	8 hrs
PST	260 mg/m ³	24 hrs	35 ppm	1 hr
	75 mg/m ³	promedio aritmético anual	n/d	n/d
PM10	150 mg/m ³	24 hrs	150 mg/m ³	24 hrs
	50 mg/m ³	promedio aritmético anual	50 mg/m ³	promedio aritmético anual
Plomo	1.5 mg/m ³	promedio aritmético de tres meses	1.5 mg/m ³	3 meses

En las figuras 1, 2 y 3 se presentan, en porcentaje, las violaciones que se han presentado a las normas de bióxido de azufre (SO₂) particuladas suspendidas totales (PST) y menores de diez micras (PM10), y plomo (Pb), respectivamente, para los últimos diez años.

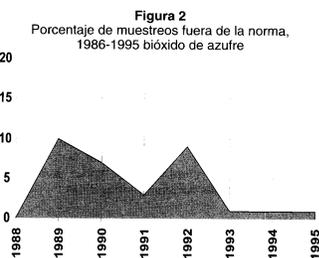
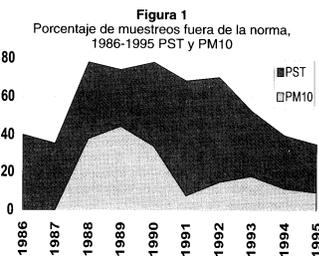
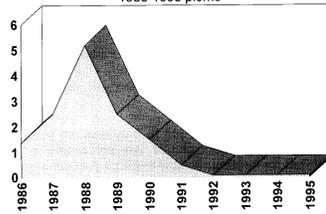


Figura 3
Porcentaje de muestreos fuera de la norma, 1986-1995 plomo



En particular, se puede apreciar en la figura 1, que los porcentajes de muestreos fuera de norma para PST y PM10 presentan, a partir de 1990, una tendencia a disminuir.

Por su parte, las figuras 2 y 3 presentan también una reducción importante de los contaminantes a los que hacen referencia. La drástica disminución de SO₂ se explica a partir de la prohibición de la quema de hidrocarburos con azufre dentro de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) y la desulfurización de diesel para vehículos pesados que circulan dentro de esta zona.

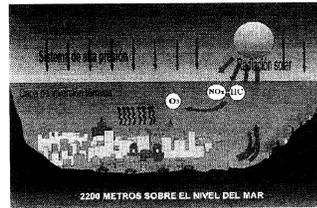
La reducción en la emisión de Pb tiene sus orígenes principalmente en dos iniciativas:

1. Reducción del contenido de plomo de 0.9 a 0.09 g/l en la gasolina Nova, a partir de 1986.
2. Reducción de 40% en el consumo de gasolina con plomo de 1989 a 1992.

Para establecer estas y otras medidas similares para la reducción de contaminantes, es indispensable primero realizar un análisis tridimensional en la ZMCM, para identificar las características meteorológicas y geográficas que afectan al fenómeno de la contaminación atmosférica (figura 4) y así poder predecir el efecto global de las acciones emprendidas.

La inversión térmica es un fenómeno atmosférico que impide la dispersión adecuada de contaminantes y esto, aunado a la radiación solar produce

Figura 4
Características fisiográficas y meteorológicas

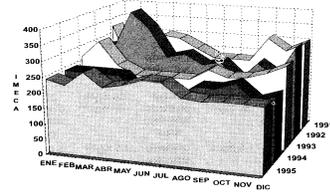


reacciones fotoquímicas que generan una mayor concentración de ciertos contaminantes como el ozono (O₃). Además, sistemas de alta presión a gran escala, que se presentan en la ZMCM, condicionan también la fácil producción de los oxidantes fotoquímicos.

Para reportar la concentración de contaminantes atmosféricos en la ZMCM, se ha diseñado un índice común para todos contaminantes criterio. Este se conoce como Índice Metropolitano de la Calidad de Aire (IMECA), y adopta un valor de 100 cuando la concentración de un contaminante alcanza el valor establecido de norma.

La figura 5 presenta los valores máximos mensuales del IMECA, detectados en cada estación de la

Figura 5
Ozono máximos mensuales en la ciudad de México



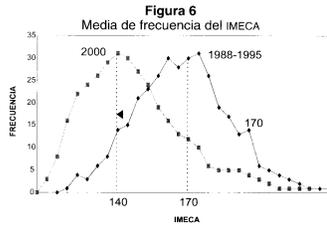
red de monitoreo de la ZMCM para los años 1988 a 1995. Se observa que no cumplimos con las Normas en más de 300 días al año, así como también el número de días que se han rebasado los 100, 200, 250 y 300 puntos IMECA (tabla 2).

Tabla 2
Tendencia IMECA 1988-1995

Año	Mayor que 100	Mayor que 200	Mayor que 250	Mayor que 300
1988	329	67	11	1
1989	329	15	3	0
1990	328	84	27	3
1991	353	173	56	8
1992	333	123	37	11
1993	324	80	14	1
1994	344	93	4	0
1995	324	88	6	0

De acuerdo con los informes históricos, los contaminantes que se presentan con mayor intensidad en la ZMCM son el ozono y las partículas suspendidas totales. Los valores máximo mensuales de ozono se presentan para 1991 y 1995 en la figura 5, donde es posible apreciar que en invierno de 1991 y 1992 se presentaron los niveles más altos reportados para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Para comprender la variación en las concentraciones de ozono medidas en la ZMCM, además de analizar las condiciones meteorológicas, debemos conjuntarlas con los datos de emisiones de los precursores de la formación de este contaminante fotoquímico: esto es, hidrocarburos y óxidos de nitrógeno.



En la tabla 3, se presenta el inventario, por sector económico, de emisiones de los gases precursores de ozono para el año 1995, mientras que la tabla 4 se calcula, mediante los datos disponibles del inventario del Sistema Nacional de Emisiones de Fuentes Fijas (SNEFF), la contribución porcentual de las diferentes fuentes.

Tabla 3
Inventario de Emisiones de Precursores de ozono en la ZMCM
Porcentaje en Peso por Contaminante 1995

Sector	NO _x	HC
Industria	10.6	3.19
Termoeléctricas	13.9	0.01
Servicios	4.2	38.90
Transportes	71.3	54.10
Vegetación y suelos	0.0	3.80
Total	100.0	100.00

Ante la complejidad de contaminación atmosférica en la Ciudad de México se ha realizado diferentes acciones:

- La elaboración de los inventarios de emisiones. Las tablas anexas (tabla 5 a tabla 7) ejemplifican la información con la que se cuenta actualmente para la identificación y análisis de las fuentes de emisión en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.
- Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el valle de México (PROMECA). La información contenida en los inventarios de emisiones sirvió para el desarrollo de un programa global de mejoramiento de la calidad del aire en la ZMCM, el cual cuenta con metas muy bien definidas a realizarse a partir de 1996 al 2000.

Los objetivos de este programa son:

1. Elevar el número de días en que no se rebasan los 100 puntos del Índice Metropolitano de la Calidad de Aire.
2. Reducir la frecuencia de ocurrencias de contingencias ambientales (IMECA mayor a 250 puntos).
3. Desplazar la media de distribución de frecuencias de las concentraciones máximas de ozono hacia la izquierda (figura 6).

Tabla 4
Cálculo de Emisiones en Fuentes Fijas
HC y NOx en la ZMCM
31 Diciembre 1994

Rango de emisión (ton/año)	No. de empresas	% de empresas respecto al total	Emisión (ton/año)			% de emisión respecto al total
			HC	NO _x	Total	
>6	466	10.08	23 194.08	30 342.36	53 536.44	96
>12	289	6.25	22 476.24	29 473.08	51 949.32	93
>18	228	4.93	21 936.48	29 045.76	50 982.24	91
>60	94	2.03	19 595.88	26 546.16	46 142.04	83
>90	74	1.60	19 064.40	25 768.57	44 832.97	80
>120	56	1.21	17 721.84	24 954.84	42 676.68	76
Número total de empresas de la base de datos						4 623
Emisiones totales (HC + NO _x)						55 830.89 ton/año
Emisiones totales HC						24 310.97 ton/año
Totales NO _x						31 519.92 ton/año

4. Mejorar la salud de la población y disminuir riesgos ambientales. lograr la descentralización, identificando los sectores de la población participantes.

Para lograr estos objetivos se han identificados cuatro grandes campos de acción:

- I. Industria limpia. Reducción de emisiones por unidad de valor agregado en la industria y servicios.
- II. Vehículos limpios. Disminución de las emisiones por kilómetros recorrido.
- III. Transporte eficiente y nuevo orden urbano. Regulación del total de kilómetros recorridos por automotores.
- IV. Recuperación ecológica. Abatimiento de la erosión.

Dentro de cada uno de estos campos de acción se establecen instrumentos específicos que deberán implementarse en forma condensada por los diferentes sectores involucrados; la tabla 8 enumeran los instrumentos de política ambiental planteados para

Finalmente, es importante mencionar que la problemática ambiental en la materia de contaminación atmosférica no concierne únicamente a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, ya que en nuestro país existen otros núcleos de actividad industrial que se ven amenazados por este problema.

Tabla 5
Emisiones estimadas para fuentes fijas

Área	No. empresas encuestadas	Emisiones totales ton/año					Total
		PST	SO ₂	CO	NO _x	HC	
D.F.	21 131	49 009 380	377 12 735	155 064	19 648	616 835	
Zona c/ urbana al D.F.	11 582	206 453	62 358	44 399	123 893	38 019	475 070

Tabla 6
Inventario de emisiones de la ZMCM 1994
(ton/año) y porcentaje en peso por contaminante

	PST		SO ₂		CO		NO _x		HC		Total	
	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%	ton/año	%
Industria	6 358	1.4	26 051	57.3	8 696	0.4	31 520	24.5	33 099	3.2	105 724	3.0
Servicios	1 077	0.2	7 217	15.9	948	0.1	5 339	4.2	398 433	38.9	413 014	10.0
Transporte	18 842	4.2	12 200	26.8	2 348 497	99.5	91 787	71.3	555 319	54.1	3 026 645	75.0
Vegetación y suelos	425 337	94.2	0	0.0	0	0.0	0	0.0	38 909	3.8	464 246	12.0
Total	451 614	100.0	45 468	100.0	2 358 141	100.0	128 646	100.0	1 025 760	100.0	4 009 629	100.0

Tabla 7
Inventarios de Emisiones 1994 ZCM (ton/año)

Tipo de fuente	PST	SO ₂	CO	NO _x	HC	Total
Industria (1)						
Generación de energía eléctrica	162.72	19.32	1 291.06	17 854.92	97.32	19 425.36
Refinación de petróleo/petroquímicas	6.94	84.96	4.68	28.44	157.56	282.48
Industria química	973.68	3 442.92	2 600.64	2 476.68	7 198.37	16 692.29
Minerales metálicos	549.84	621.84	1 458.36	553.44	461.04	3 644.52
Minerales no metálicos	1 675.32	11 710.56	323.28	4 933.96	3 167.64	21 810.35
Productos vegetales y animales	111.36	841.80	40.08	260.16	238.68	1 492.08
Madera y derivados	384.36	3 912.24	463.32	1 821.96	1 442.40	8 024.28
Productos de consumo alimenticio	799.32	211.56	405.96	1 069.44	397.08	4 782.36
Industria del vestido	459.96	2 110.56	405.96	1 069.44	397.08	4 782.36
Productos de consumo (varios)	66.60	108.72	74.16	678.36	303.84	1 231.68
Productos de impresión	775.92	19.44	15.00	13.68	5 015.04	5 839.08
Productos metálicos	196.92	559.08	653.40	467.88	1 547.64	3 424.92
Productos de consumo de vida media	98.88	37.80	100.68	69.96	599.40	906.72
Productos de consumo de vida larga	93.36	172.20	523.80	196.20	2 958.60	3 944.16
Artes gráficas (2)	0.00	0.00	0.00	0.00	8 787.80	8 787.80
Otros	2.64	5.16	7.68	4.08	121.32	140.88
Servicios (2)						
Lavado y desengrase (2)	0.00	0.00	0.00	0.00	29 044.28	29 044.28
Consumo de solventes (2)	0.00	0.00	0.00	0.00	42 005.30	42 005.30
Almac. y distribución de gasolina	0.00	0.00	0.00	0.00	20 127.12	20 127.12
Mercadeo y distribución de gas LP (3)	0.00	0.00	0.00	0.00	242 272.03	242 272.03
Oper. de lavado en seco (tintorerías)	0.00	0.00	0.00	0.00	12 213.40	12 213.40
Superficies arquitectónicas	0.00	0.00	0.00	0.00	21 597.84	21 597.84
Panaderías	0.00	0.00	0.00	0.00	2 290.90	2 290.90
Pintura automotriz	0.00	0.00	0.00	0.00	5 975.50	5 975.50
Pintura de tránsito	0.00	0.00	0.00	0.00	3 381.05	3 381.05
Esterilización en hospitales	0.00	0.00	0.00	0.00	20.12	20.12
Incineración en hospitales	0.00	0.00	0.00	0.00	0.51	0.51
Uso de asfalto	0.00	0.00	0.00	0.00	19 095.32	19 095.32
Plantas de tratamiento de aguas residuales	0.00	0.00	0.00	0.00	56.10	56.10
Combustión en hospitales	8.13	20.13	18.43	73.57	2.69	123.15
Combustión residencial	372.10	1 483.23	729.50	3 807.70	289.73	6 682.26
Combustión comercial/institucional	696.54	5 713.44	199.66	1 457.14	61.22	8 128.00
Transporte (4)						
Auto particular	10 321.00	6 061.50	1 044 008.00	31 913.00	253 865.70	1 346 169.20
Pick-up	1 049.00	353.80	73 419.40	2 675.30	19 373.64	96 871.14
Microbús	397.00	827.40	224 077.60	9 395.70	66 472.89	301 170.59
Combi	42.00	650.40	134 954.00	4 918.00	35 108.70	175 673.10
Taxi	612.63	3 072.70	529 530.00	15 982.00	126 574.80	675 772.13
Autobús (R-100)	1 900.00	366.00	5 655.00	6 751.30	2 337.20	17 009.50
Foráneos, suburbanos	120.00	102.20	57 332.70	2 485.60	2 055.10	62 095.60
De carga	360.00	37.00	271 321.10	5 867.60	46 099.68	323 685.38
De carga (más de dos ejes)	1 902.00	366.00	5 655.00	6 751.30	2 337.20	17 009.50
Autobús municipal	2 075.00	400.00	1 777.70	2 591.40	781.60	7 625.70
Locomotoras	38.52	26.28	50.52	414.00	16.84	546.16
Locomotoras de pato	24.91	36.50	50.12	293.96	29.59	437.08
Aeropuerto	0.00	0.00	1 583.23	1 294.89	523.43	3 341.55
Vegetación (5)						
Vegetación	0.00	0.00	0.00	0.00	38 909.00	38 909.00
Suelos (6)						
Suelos	425 337.00	0.00	0.00	0.00	0.00	425 337.00
Total	451 613.55	45 467.98	2 358 141.34	128 645.59	1 015 759.26	4 009 627.72

Referencias:

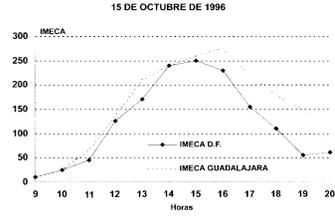
- 1) Fuente: Instituto Nacional de Ecología, Sistema Nacional de Información de Fuentes Fijas, 1994.
- 2) Fuente: Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Ecología, Subdirección de Inventarios de Emisiones y Atención a Contingencias, 1994.
- 3) Fuente: Evaluación realizada por la Subdirección de Inventarios de Emisiones, DDF, Dirección General de Ecología, 1995.
- 4) Fuente: Departamento del Distrito Federal, Dirección General de Proyectos Ambientales, Dirección de Estudios de Proyectos Ambientales, 1994.
- 5) Fuente: UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera, reporte final de Cálculos y Mediciones de Hidrocarburos Naturales en el Valle de México, 1984.
- 6) Fuente: UNAM, Manual de Inventarios de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera, Estudio de Emisión de Partículas generadas por Fuentes Naturales, 1990. Esto se verificará con nuevos cálculos.

Tabla 8
Programa de Medio Ambiente 1995-2000

Entidades receptoras objetos de descentralización	Posibilidades de descentralización de instrumentos para la política ambiental						
	Gobierno Federal	Concurrencia	Gobiernos Estatales	Gobiernos Municipales	Instituciones académicas	Sector privado	Organiza- ciones sociales
1. Normas oficiales mexicanas	Diseño de normas				Participación en comités	Participación en comités	Participación en comités
2. Regulación directa y licenciamiento industrial	Formulación y expedición		Información			Información	
3. Regulación directa de residuos y riesgo	Formulación y expedición		Información			Información	
4. Autorregulación	Promoción y concertación		Promoción y concertación	Promoción y concertación	Certificación	Promoción y concertación	Promoción y concertación
5. Criterios de regulación del desarrollo urbano	Definición de criterios	Federación, estados y municipios	Aplicación y desarrollo de criterios	Aplicación y desarrollo de criterios	Investigación urbano-regional	Información	
6. Regulación directa de la vida silvestre	Formulación y expedición		Información			Información	
7. Áreas naturales protegidas	Promoción, decreto, administración y financiamiento	Federación, estados y municipios	Promoción, administración, manejo y financiamiento	Promoción, administración, manejo y financiamiento	Administración y manejo	Administración, proyectos y financiamiento	Manejo y desarrollo de programas
8. Evaluación de impacto ambiental	Análisis y resolución	Sectores público, académico, social y privado	Autorización en principio	Autorización en principio	Opinión técnica	Audiencias públicas	Audiencias públicas
9. Ordenamiento Ecológico del Territorio	Promoción, proyectos y apoyo técnico	Sectores público, académico, social y privado	Promoción, desarrollo, consulta y expedición	Promoción, desarrollo, consulta y expedición	Análisis y proyectos	Consulta y concertación	Consulta y concertación
10. Instrumentos económicos	Diseño promoción y aplicación	Federación, estados y municipios	Promoción, recaudación y aplicación	Promoción, recaudación y aplicación		Participación	
11. Promoción educativa	Promoción y proyectos	Sectores público, académico, social y privado	Programas y proyectos	Programas y proyectos	Nuevas tecnologías y proyectos	Aplicación y desarrollo de proyecto	Aplicación y desarrollo de proyecto
12. Información ambiental	Construcción del Sistema Nacional de Información Ambiental	Sectores público, académico, social y privado	Participación en la construcción del sistema de acceso	Participación en la construcción del sistema de acceso	Participación en la construcción del sistema de acceso	Participación en la construcción del sistema de acceso	Participación en la construcción del sistema de acceso
13. Educación e investigación	Programas y proyectos	Sectores público, académico, social y privado	Capacitación y aplicación de resultados	Capacitación y aplicación de resultados	Programas y proyectos de investigación	Aplicación de resultados y financiamiento	Programas de educación ambiental
14. Inspección y vigilancia	Instrumentación directa	Federación, estados y municipios	Instrumentación	Instrumentación			Participación en comités mixtos de inspección y vigilancia
15. Recursos financieros	Mecanismos de coordinación fiscal	Federación, estados y municipios	Recaudación y aplicación de instrumentos fiscales	Recaudación y aplicación de instrumentos fiscales			
16. Operación de activos e infraestructura	Definición de infraestructura a transferir		Administración y manejo de instalaciones y activos	Administración y manejo de instalaciones y activos			

Fuente: Instituto Nacional de Ecología, 1996.

Figura 7
Comparación de los niveles de ozono en las zonas metropolitanas del Valle de México y Guadalajara



Para propósitos comparativos de la calidad del aire en la ZMCM y otras ciudades, representan las figuras 7 y 8 correspondientes a las ciudades de México, Guadalajara y Monterrey.

Figura 7b
Comparación de los niveles de ozono en las zonas metropolitanas del Valle de México y Guadalajara

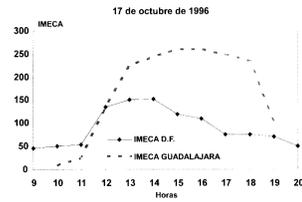
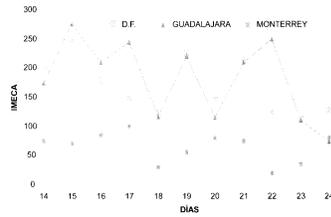


Figura 7a
Comparación de los niveles de ozono en las zonas metropolitanas del Valle de México y Guadalajara



Para ser posible esta comparación se han transformado las concentraciones de contaminantes medidas en estas dos últimas ciudades en términos del IMECA empleado en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Figura 8
Picos diarios de ozono del 14 al 24 de octubre de 1996



SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO SICORI/PEMEX

*Carlos Ruiz de Velasco, Armando Madera Sosa,
Oscar López Castillo y Carmen Reyes Guerrero
Petróleos Mexicanos
Unidad Corporativa de Sistemas de Información Geográfica*

Introducción

La influencia del proceso de cambio a nivel mundial en los órdenes jurídico, social y político, se define con la estrategia de cambio a la modernización plasmada en el plan nacional de desarrollo. El plan genera responsabilidades para que los titulares de las entidades de la administración pública federal adopten las acciones y medidas necesarias para su cabal cumplimiento.

Dentro de este marco, se elaboró el programa de modernización energética, en el que queda comprendido el sector petrolero.

Para afrontar este reto la Dirección Corporativa de Administración de Petróleos Mexicanos desarrolló el Sistema Corporativo de Información Geográfica (SICORI).

Este proyecto iniciado en 1991 incorpora y maneja todos los datos disponibles mediante el uso de la más avanzada tecnología de sistemas de información geográfica (SIG) y los convierte en valiosa información que relaciona las actividades petroleras con el espacio geográfico donde éstas se desarrollan. De este modo queda reflejado gráfica y descriptivamente el ámbito petrolero a semejanza de un retrato fiel y dinámico.

El SICORI se distingue por su alto grado de complejidad, si consideramos algunas de sus características. En primer término su amplitud de cobertura nacional. Otro aspecto es la base de datos, que ha sido diseñada para manejar y procesar grandes volúmenes de información alfanumérica y gráfica, para realizar análisis espacial y estadístico que constituyen un apoyo para la planeación y toma de decisiones ejecutivas.

Los sistemas de información geográfica tienen la capacidad de poder efectuar relaciones espaciales utilizando la topología que para los SIG es el método matemático usado para definir relaciones existentes entre espacios geográficos, especificando la conexión entre rasgos o contigüedad, contenido y conectividad.

Con el desarrollo de los sistemas de información converge el conocimiento de varias disciplinas tales como Cartografía, Computación, Matemáticas, Geografía, Topografía y Geodesia, entre otras, por lo que se considera actualmente una nueva ciencia. Su aplicación es diversa por lo que para obtener en su utilización una mejor respuesta a su potencial, en proyectos de cierta magnitud y complejidad, es necesario disponer de un grupo multidisciplinario que lo lleve a una explotación más conveniente.

El SICORI dispone actualmente y por primera vez en nuestro país de la cartografía digital en formato *raster* de la República Mexicana, escalas 1:50 000, 1:250 000, 1:1 000 000 y 1:4 000 000. Esta información fue tomada del acopio cartográfico nacional mediante un convenio de colaboración técnica entre el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y Petróleos Mexicanos (Pemex), lo que nos permitió escanear (lectura óptica digital) los originales de los niveles básicos que integran cada carta topográfica: altimetría, planimetría, hidrografía y vegetación. Esta cartografía de acuerdo a las necesidades de Pemex se ha ido vectorizando y actualizando con imágenes de satélite.

Este sistema permite la administración del universo de imágenes, permitiendo la recuperación de mapas a través de un conjunto de datos alfa numé-

ricos. Este sistema se utiliza para controlar los procesos de vectorización e integración de los distintos subsistemas y para apoyar el servicio cartográfico que ofrece el Sistema Corporativo de Información Geográfica

En la base de datos cartográfica, están almacenados cada uno de los mapas que se están convirtiendo a formato vector para manejarlos como inteligentes y tanto esta versión como los de formato *raster* están incorporados a la base de datos.

Modelos de calidad del aire por medio del programa UPMDC-2

Como respuesta a la preocupación de Pemex por su impacto sobre el medio ambiente, la Unidad de Planeación de la Dirección Corporativa de Administración SICORI, en un esfuerzo conjunto, ha llevado a cabo la implantación de modelos matemáticos para la simulación y estudio de la dispersión de contaminantes en la atmósfera.

El objetivo perseguido es el desarrollo de herramientas que permitan simular y evaluar en forma objetiva los impactos ambientales (en aire, agua y tierra) de las instalaciones actuales y futuras de Pemex, con el apoyo del SICORI cuya base está constituida por un sistema de información geográfica.

La estrategia que se siguió para el logro del objetivo planeado consistió en:

- Selección de los modelos matemáticos más adecuados.
- Efectuar el desarrollo de los modelos a través de las herramientas que permitieran el mayor acoplamiento con la infraestructura (*hardware* y *software*) de que consta el SICORI y, de este modo, aprovechar al máximo las facilidades de despliegue y análisis que ya se tienen en el sistema.

Como resultado se implantó el modelo por medio del programa UPMDC-2, desarrollado por personal de estas unidades, que permite:

- Simulación de emisión continua bajo condiciones atmosféricas específicas (eventos particulares).

- Simulación de emisión continua bajo condiciones atmosféricas promedio (evaluación de impacto estacionario), figura 1.
- Simulación de emisión súbita (PUFF) bajo condiciones atmosféricas particulares, figura 2.
- Acoplamiento inmediato de la salida del modelo a los mecanismos de despliegue del SICORI para representación gráfica de los resultados.
- Utilización del *software* para cálculo de áreas afectadas, isolíneas y perfiles de concentración, figura 3.
- Interacción con el usuario a través de cajas de diálogo para introducir datos y desplegar resultados.

Tecnología geomática

La geomática

La geomática es un concepto moderno que maneja la información geográfica y de ninguna manera excluye los métodos gráficos, se centra en la capacidad de desarrollar sistemas de información geográfica (SIG), para almacenar, comparar y relacionar información espacial como nunca antes se había hecho. Complementándose con los levantamientos geodésicos y el uso de los sensores remotos, la aplicación de este concepto varía, no obstante, de país a país e inclusive, de usuario a usuario en un mismo país.

A manera de ejemplo, por un lado se puede requerir de los SIG para tomar decisiones que afectan la explotación de recursos naturales y la movilidad de la población; y por otro, para establecer las interacciones entre la propiedad de la tierra, el uso del suelo y las medidas de planificación. En otro ejemplo, el interés puede basarse completamente en problemas mucho más locales, referentes al trazado subterráneo de servicios en sitios localizados de ciudades congestionadas.

Sistemas de información geográfica

Los SIG se han convertido en una importante herramienta operacional, con la cual los profesionales obtienen enorme beneficios en términos de mantener y analizar información espacial.

En el desarrollo de cualquier SIG, el costo es fácil de medir, pero no se debe pensar que la adquisición

Figura 1
Simulación de una emisión continua

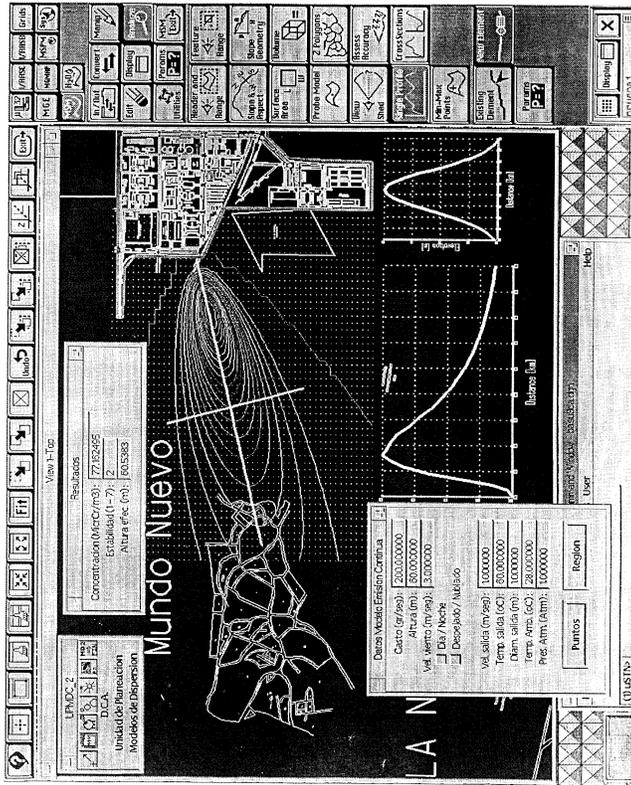


Figura 2
Simulación de una emisión subita (puff)

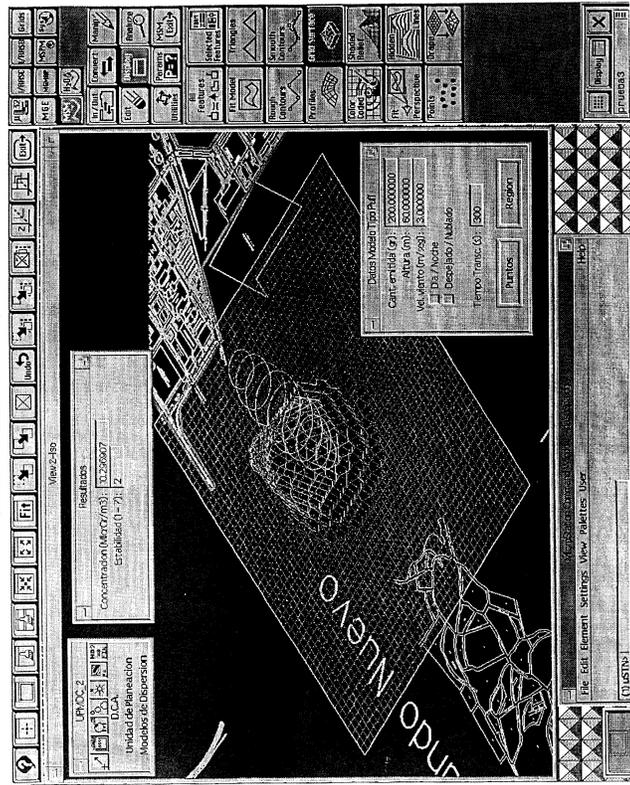
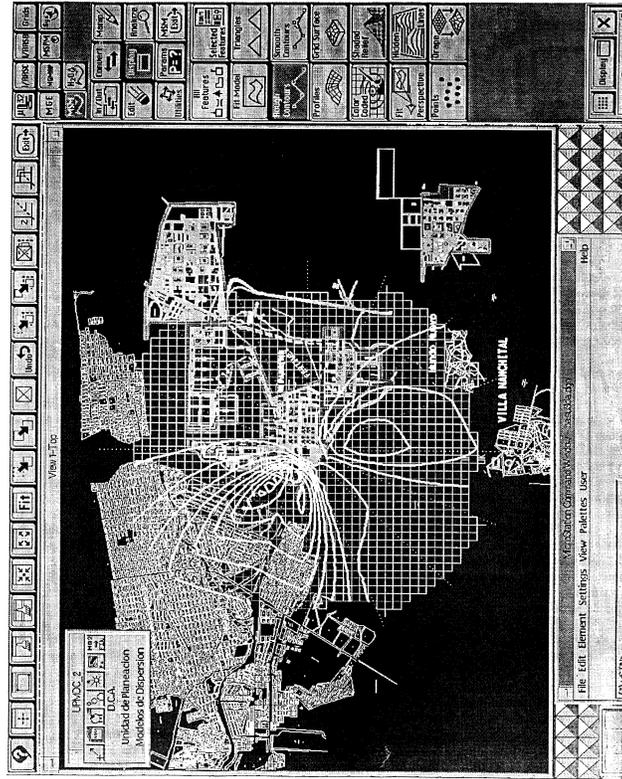


Figura 3
Representación del cálculo de áreas afectadas



de equipo y de *software* es el aspecto más importante. Mucho más caro es el trabajo de geoposicionar y digitalizar la información existente, sea catastral, socio-política y económica, agrícola, cartográfica o topográfica, de activos inmuebles, etcétera.

En el aspecto de las referencias a las fuentes de información, es fundamental que el INEGI ejerza toda su autoridad para garantizar el cumplimiento de la normatividad correspondiente y que haya únicamente "La mejor fuente" para cada clase de información, con disponibilidad y que pueda ser utilizada por todos.

Si se busca que un proyecto geomático sea de valor, éste debe ser capaz de combinar y comparar diversos tipos de información, de tal manera que no haya duda para nadie, en el sentido de tener que utilizar únicamente un sistema de referencia espacial. Dicho sistema debe ser por supuesto, el de coordenadas globales, disponible de manera directa o por intermedio de programas de transformación de coordenadas.

Los levantamientos por Sistema de Posicionamiento Global

El sistema de posicionamiento global (GPS por sus siglas en inglés) se está convirtiendo en la más importante herramienta que la tecnología ha ofrecido para efectuar el posicionamiento en tierra, mar y aire. Con toda una constelación de una treintena de satélites en órbita, se proporciona posiciones espaciales para puntos fijos o en movimiento durante las 24 horas del día, independientemente de las condiciones meteorológicas. La precisión varía desde milímetros para el posicionamiento relativo hasta algunos cientos de metros para la posición absoluta, permitiendo una amplia variedad de mediciones especiales de acuerdo con necesidades específicas.

El GPS es el medio preferido para la densificación de la redes geodésicas, los levantamientos de precisión para la ingeniería y el monitoreo de las deformaciones de la corteza terrestre. El GPS se ha diseminado rápidamente dentro del mundo de la navegación, abriendo nuevos horizontes.

El GPS está definido como la mejor herramienta para proporcionar la referencia espacial para los sistemas de información geográfica.

Este sistema junto con el GIS están directamente relacionados con los avances en la tecnología, alcanzando ambas herramientas su popularización. La interfase entre ambos es integral, requiriendo el mínimo desarrollo de *software*.

Sensores remotos

Los sensores remotos son capaces de producir imágenes de alta calidad en forma analógica, es decir como una representación continua en tonos de gris o bien en forma digital que está compuesta por elementos como puntos o cuadrados muy pequeños considerados como elementos digitales unitarios llamados píxeles.

Imágenes de satélite

En las imágenes digitales se utiliza la energía electromagnética que llega desde el sol a través de la atmósfera hasta la superficie terrestre, de allí es reflejada a los sensores del satélite. Desde luego hay que mencionar que la atmósfera transmite, absorbe y dispersa la energía; la energía pasa a través de la atmósfera y puede alcanzar al sensor sin alteraciones, la energía absorbida calienta la atmósfera o es remitida al sensor con características alteradas.

La obtención de las imágenes de satélite se obtiene a partir del registro del espectro de la reflectancia, que es la porción de la energía reflejada, tanto la que llega sin alteraciones como la que tiene características de alteración, siendo ésta la que se identifica en la imagen como "ruido" no confiable para análisis, la cual hay que eliminar en la etapa de procesamiento de la imagen.

Las imágenes de satélite de aplicación práctica son las de los satélites Landsat IV y V, éstos tienen una órbita polar, repetitiva y circular. La altitud de la órbita promedio es de 705.3 km, cada viaje alrededor de la tierra toma 98.9 minutos con un poco más de 14 órbitas completas cada día, registran siete bandas espectrales y cubre una área aproximada de 31 000 km² en cada imagen.

En '986 el Gobierno Francés lanzó el satélite SPOT 1, posteriormente ubicó las versiones SPOT II y III, con tres bandas pancromáticas, teniendo un cubrimiento de 3 600 km².

La banda pancromática corresponde a la porción visible del espectro electromagnético correspondiendo cada pixel registrado a un área de terreno de 10x10 metros.

El registro de distintas bandas espectrales se realiza para cubrir toda la gama de energía reflejada que presenta variación de acuerdo a los distintos materiales líquidos o sólidos que se encuentran en la superficie.

Las imágenes de satélite para ser utilizadas deben ser orientadas o georreferenciadas, así como corregidas geoméricamente a fin de tener el área registrada en vista vertical. A partir de estas correcciones las imágenes son sometidas a distintos procesos digitales de acuerdo a la aplicación deseada.

La interpretación de las imágenes de satélite una vez procesadas, requieren de cierta habilidad metodológica para realizarla exitosamente, por lo que se considera toda una especialidad técnica, adicional al conocimiento disciplinario de la aplicación deseada.

La utilización de las imágenes captadas por los sensores de los satélites es una tecnología que se conoce como "teledetección o detección remota", representa una alternativa eficiente para reunir datos de una extensa área de terreno comparada con los levantamientos realizados con medios tradicionales. Las aplicaciones pueden ser de tipo operativo de planeación estratégica, entre las que destacan:

- Elaboración de cartografía temática.
- Observación de rendimiento agrícola y estado de cultivos y vegetación.
- Observación del uso de suelo.
- Estudios de impacto ambiental y evaluación de recursos materiales.
- Actualización de mapas topográficos.
- Exploración mineral y petrolífera.
- Evaluación de la ubicación de proyectos.

Esta tecnología resulta de capital importancia en países como el nuestro, en donde las fuentes básicas de información como los mapas y las estadísticas sobre recursos naturales y condiciones de medio ambiente están incompletas o desactualizadas.

Actualmente el SICORI ha iniciado su programa de teledetección mediante el procesamiento e inter-

pretación de imágenes SPOT y LANDSAT, con el fin principal de actualizar la cartografía petrolera y obtener datos básicos para que los usuarios los utilicen en las aplicaciones que su especialidad requiera. El programa comprende el empleo de *software* y *hardware* adecuado del cual ya se dispone, la integración de una mapoteca digital de imágenes y de la habilitación del recurso humano debidamente capacitado por expertos.

Una imagen de satélite se puede definir como una matriz numérica que representa en sus valores, el grado de reflectividad a la luz solar o la radiación térmica de los elementos físicos de un paisaje.

Existen diferentes tipos de imágenes, entre las más usuales comercialmente están las imágenes LANDSAT y las imágenes SPOT, las cuales se caracterizan por su resolución (tamaño de los pixeles que son los elementos más pequeños de una imagen) o bien por el número de bandas que éstas manejan.

Imágenes digitales de video

La teledetección videográfica es una alternativa real para obtener información de rasgos del terreno con gran amplitud de detalle, con un bajo costo de obtención y disponibilidad inmediata de la información, además de la posibilidad de elegir la resolución temporal, para la mejor caracterización de los fenómenos dinámicos.

El uso de imágenes de video con fines de evaluación del terreno ha adquirido una importancia considerable en los últimos años. Tal importancia ha conducido, por un lado, a que se consideren esas aplicaciones como parte de una nueva disciplina relacionada cercanamente con el uso de fotografías aéreas, y por otro, con el empleo de imágenes en percepción remota convencional, es decir, la realizada a partir de información registrada desde plataformas satelitarias y aeronaves. A esta nueva disciplina se le conoce como videografía o teledetección videográfica.

Principales ventajas:

1. Disponibilidad de las imágenes, cercana al tiempo real.
2. Comprobación del éxito de las tomas durante su registro en el mismo sitio de estudio.

3. Evaluación a gran detalle y cuantificación de fenómenos con alto grado de precisión.
4. Disponibilidad de las imágenes en formato digital para su procesamiento en computadora.
5. Bajos costos de operación.
6. Disponibilidad de interpretación mono y estereoscópica, en color natural (30 cuadros/segundo).
7. Posibilidad de hacer anotaciones en el sonido de la cinta.
8. Posibilidad de obtener imágenes desde baja altura, lo cual elimina la influencia de nubes.
9. Posibilidades de elegir las resoluciones temporal, espacial y espectral de las imágenes.
10. Desarrollo tecnológico constante del equipo empleado.
11. Posibilidad de uso de filtros multiespectrales.
12. Registro a mayor detalle a través del mecanismo de acercamiento (*zoom*).

Principales desventajas:

1. Menor resolución espacial al comparar con fotografía aérea convencional.
2. Deformaciones causadas por proyección central en función de la distancia focal empleada.
3. Altos costos para obtener en papel, impresiones de buena calidad de imágenes en color.

HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES PARA EL PRONÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE

*Raúl Rivera Palacios
Instituto Nacional Ecología*

Resumen

El plan de contingencias ambientales por episodios de contaminación atmosférica en la Ciudad de México es aplicado cuando los niveles de ozono (O_3) tienden a elevarse arriba de las normas mexicanas establecidas y la presencia de condiciones meteorológicas desfavorables para la dispersión de los contaminantes, ocasiona la aplicación de medidas preventivas y correctivas para disminuir la concentración de éstos; durante dichos episodios, los meteorólogos han logrado ampliar la base de sus conocimientos y experiencias al llevar a cabo la elaboración del pronóstico de la calidad del aire.

Por estos motivos, el Instituto Nacional de Ecología desarrollo un sistema experto (denominado SEPCA), para el pronóstico de la calidad del aire en la zona metropolitana de la Ciudad de México.

El SEPCA es un sistema computarizado basado en la simulación del proceso que sigue un experto meteorólogo cuando prepara el pronóstico de la calidad del aire, asimismo, fue desarrollado para retener los conocimientos y experiencias adquiridas por los especialistas, por lo que también es considerado como un medio de entrenamiento y capacitación para futuros meteorólogos ambientales.

El sistema experto funciona bajo diversas condiciones de información disponible, haciendo uso de observaciones meteorológicas de superficie y altura, de los análisis sinópticos y de la información generada por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México.

Desde noviembre de 1993, SEPCA fue transferido y ha sido empleado por la Comisión Metropolitana para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en el Valle de México, para

apoyar la elaboración del pronóstico rutinario de la calidad del aire, mostrando un nivel de confiabilidad razonable.

El sistema experto

El sistema experto para el pronóstico de la calidad del aire, desarrollado para la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) utiliza un conjunto integrado de programas de computadora que simulan el proceso mediante el cual los meteorólogos preparan los pronósticos de la calidad del aire. Para que SEPCA elabore este trabajo, los conocimientos y experiencias de los meteorólogos han sido codificados como objetos y reglas en un lenguaje entendible por la computadora.

Los objetos que definen el entorno del pronóstico son los fenómenos y sistemas meteorológicos; por ejemplo, los sistemas de alta y baja presión, la corriente de vientos máximos, los ciclones, la inversión térmica, etcétera.

Las reglas son todo aquel conocimiento proporcionado por el meteorólogo donde se relaciona el objeto con un atributo numérico y/o lógico del mismo, así como la consecuencia de éste en la variación de los niveles de contaminación: una regla de aplicación que constituye una experiencia de los meteorólogos es, por ejemplo:

Cuando la corriente de vientos máximos (objeto) se encuentra sobre la ZMCM con velocidad de 160 km/h (atributo numérico del objeto), el nivel de contaminación es bajo (regla).

Para la implantación de las reglas se consideraron las variaciones anuales, estacionales, semanales y diarias de los fenómenos meteorológicos; la relación entre condiciones simultáneas, los procesos

termodinámicos, la orografía, y las experiencias acumuladas durante la ocurrencia de anteriores periodos de contingencia ambiental.

Componentes de Sistema Experto de Predicción de la Calidad del Aire

Para mostrar la información y comunicarse con SEPCA, se utiliza la interfase gráfica y el uso de ventanas, favoreciendo la construcción de utilerías computacionales que ayudan al meteorólogo a preparar sus análisis meteorológicos sinópticos y termodiagramas de uso rutinario, de una manera fácil y rápida, teniendo un mayor tiempo para la elaboración del pronóstico meteorológico y de la calidad del aire. El usuario se comunica con SEPCA a través de los siguientes sistemas:

Pronosticador de la calidad del aire

Es el sistema maestro que procesa para un día específico el mensaje de sondeo atmosférico de las 6:00 a.m. de la Ciudad de México, la información meteorológica sinóptica y los datos de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA) de la ZMCM del día anterior; con estos elementos y la base integrada de conocimientos, el pronosticador emite un reporte de pronóstico del comportamiento del nivel de O₃ para las próximas 24 horas.

Para llevar a cabo la tarea anterior, el pronosticador utiliza subsistemas, los cuales eventualmente pueden funcionar de manera independiente. Los subsistemas son:

1. Sonda 1. Elabora un análisis de los mensajes del radiosondeo atmosférico, proporcionando información gráfica y numérica de los perfiles verticales de temperatura, humedad y viento, parámetros de inversión térmica, índices de estabilidad, etc.
2. Datos sinópticos. Sobre un mapa geográfico, es posible elaborar el análisis gráfico de la información meteorológica sinóptica presente en la Región Meteorológica IV, comprendida por los Estados Unidos de América, la República Mexicana, Centroamérica y el Caribe. En él se analizan los centros de alta y baja presión, frentes fríos, zonas de convergencia, seguimiento de huracanes, etcétera.

3. Reporte. Es un procesador de palabras que permite preparar el reporte meteorológico y el pronóstico especializado de la calidad del aire para la ZMCM, haciendo referencia al inicio y duración de los diversos niveles de calidad del aire de las próximas 24 horas. Estos niveles se expresan en términos del Índice Metropolitano de Calidad del Aire (IMECA), según la siguiente correspondencia:

Nivel	Valor IMECA
Bueno	0 a 30
Satisfactorio	31 a 100
No satisfactorio	101 a 200
Malo	201 a 300
Muy malo	Mayores de 301

Niveles de pronóstico proporcionados por SEPCA

El principio de funcionamiento de SEPCA es incrementar la precisión del pronóstico en base a la información que se tiene disponible en el momento de su elaboración.

Nivel 1. Pronóstico con información mínima. Se elabora a través del procesamiento estadístico de los datos históricos de niveles de contaminación. Este pronóstico produce una curva típica para cada uno de los días en cuestión; la curva es modificada por las condiciones meteorológicas de las 6:00 am y por la expectativa del nivel de actividad vehicular para el día actual en la ZMCM. A la curva pronóstico se le atribuye un nivel inicial de confianza de 60 por ciento (figura 1).

Nivel 2. Pronóstico con información meteorológica del día actual (pronóstico absoluto). Utiliza la curva anterior y compila automáticamente la información termodinámica proveniente del subsistema sonda 1, haciendo que la curva original sea modificada. La curva pronóstico puede continuar ajustándose si se considera el análisis de los sistemas meteorológicos (figura 2).

Nivel 3. Pronóstico con información meteorológica del día anterior (pronóstico relativo). El pronóstico comienza desplegando la curva de O₃ del día anterior y una curva aproximada a esta información. Para una mayor similitud entre ambas, la curva aproximada puede ajustarse manualmente a la curva de

Figura 1
Pronóstico Nivel 1

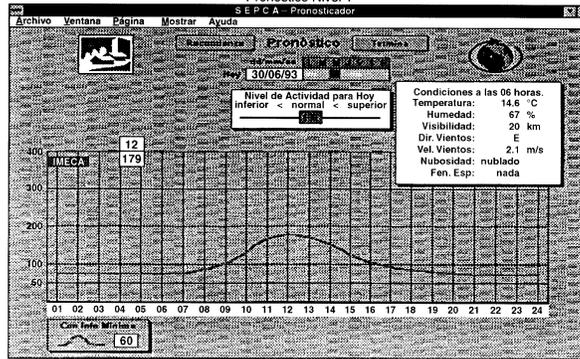


Figura 2
Pronóstico Nivel 2

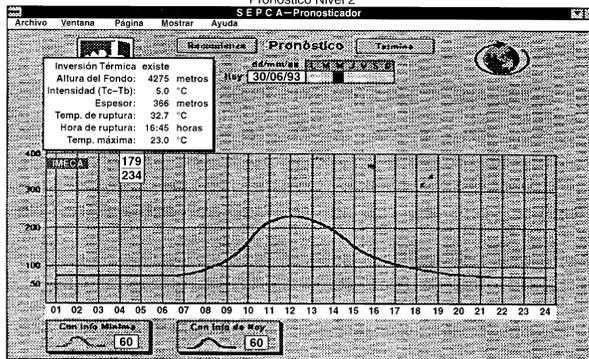
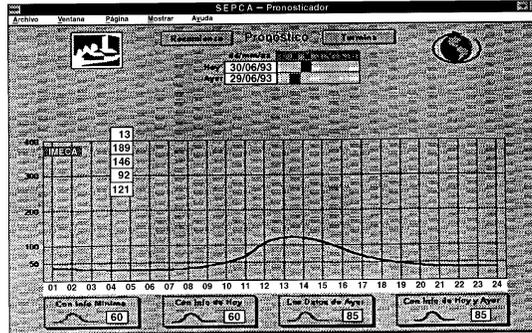


Figura 3
Pronóstico Nivel 3
SEPCA - Pronosticador



O₃ registrado. En este momento, el pronóstico de nivel tres compara la información meteorológica de los días de ayer y hoy con la curva aproximada, generando el pronóstico final del nivel de este contaminante para las próximas 24 horas (figura 3).

Conclusiones:

Por todo lo anterior, se considera que el sistema experto para el pronóstico de la calidad del aire, desarrollado para la ZMCM, presenta las siguientes ventajas:

- Proporciona al usuario un ambiente simple y rápido en la elaboración del pronóstico.
- El pronóstico elaborado posee una adecuada confiabilidad.
- Es una base de datos meteorológicos y de monitoreo atmosférico.
- Permite actualizar los valores estadísticos de parámetros meteorológicos y de los contaminantes atmosféricos.
- Permite verificar el pronóstico, al comparar los datos reales y los calculados.
- Requiere mínima información de entrada para producir pronósticos.

- Su capacidad es incrementable.
- Por su arquitectura puede alojar modelos basados en otras metodologías.
- Proporciona la posibilidad de ampliar el conocimiento de los procesos físicos y meteorológicos y su relación en la concentración o dispersión de contaminantes.
- Es relativamente económico de desarrollar e implantar cuando se compara con otros sistemas computacionales.
- Puede ser ejecutado desde una computadora personal.
- Es un prototipo para la construcción de sistemas expertos aplicados al pronóstico meteorológico especializado.

Descripción del método estadístico-matemático de pronóstico de calidad del aire en el Valle de México

El concepto de *prognosis* (valor calculado por el método) reviste una importancia fundamental para la planificación de escenarios de contaminación ambiental, ya que permite una aproximación a las situaciones que se producirán en el futuro de acuerdo a las tendencias históricas del fenómeno.

que en nuestro caso es el de la contaminación atmosférica.

El objetivo principal del estudio consiste en la obtención de un método, a la sombra del análisis factorial, capaz de estimar valores futuros ajustados a cada serie histórica del comportamiento del nivel de contaminación por O₃; en partes por millón, en cada una de las cinco zonas geográficas en las que se encuentra dividida la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Con anterioridad, se buscó describir las evoluciones históricas de los valores máximos del O₃ —entre 1988 y 1992— en cada una de las cinco zonas geográficas; en base a los valores ajustados a la serie histórica, mediante regresiones multilíneas, validar y tener conocimiento de los datos aberrantes para confiabilizar dichas series.

Otro de los objetivos fue el conocer, a partir de los factores, la relación que guardan entre sí los niveles de contaminación por O₃ en cada una de las zonas con las variables meteorológicas.

Estimación de la prognosis ambiental

Se presenta aquí el proceso desarrollado para el cálculo de la prognosis de los niveles de contaminación por O₃ en el Valle de México.

A partir de los registros del comportamiento diario de las variables meteorológicas, yuxtapuestos a los niveles máximos del O₃ en cada una de las cinco zonas geográficas en estudio, se construye el archivo base, figura 4. A este arreglo tabular se le realiza el corte en clases, o fragmentación de variables, figura 5, y se le analiza factorialmente.

Posteriormente se insertan los valores factoriales obteniendo un arreglo tabular, según el esquema de la figura 6, a partir del cual es posible realizar regresiones multidimensionales sobre los registros del O₃ y estar en condiciones de estimar valores ajustados a cada serie histórica mediante la siguiente ecuación:

$$S(j) = a_0 + \sum_i a_i F_i(\theta) + e \quad \text{III.1}$$

donde e es el error, a₀ la constante, a_i donde j = 1,...,n los valores de regresión y F_i(θ) donde j = 1,...,n. los factores

Un paso importante en el proceso lo constituye el pronóstico de las variables meteorológicas —contemplado en la metodología— ya que es a partir de estos valores que se logran ajustar sus variaciones futuras.

El método acepta la incorporación de valores de proyección de los niveles máximos de O₃ que engloban el fenómeno evolutivo referenciado, ajustándose los niveles a las correspondientes variaciones futuras.

La forma de estimar los valores de las series históricas de los niveles de contaminación por el contaminante y su prognosis está relacionada con la variación de la meteorología M, que se manifiesta como la diferencia de valores entre dos periodos dados, es decir:

$$M(O) \Big|_t^1 = \sum_j M(j)_t - M(j)_1 \quad \text{III.2}$$

donde j = 1,...,n

usando la ecuación III.1

$$\begin{aligned} &= \sum_j (a_0 + \sum_k a_k F_k(\theta)_t + e) - \sum_j (a_0 + \sum_k a_k F_k(\theta)_1 + e) \\ &= \sum_j \sum_k a_k \Delta F_k(\theta) \quad \text{y } k = 1, \dots, \theta; \theta \in A \quad \text{III.3} \end{aligned}$$

donde j es el índice de las n-variables meteorológicas involucradas, k el índice de los (θ)-factores involucrados, ΔF el incremento o decremento factorial y A el conjunto de ejes factoriales.

La composición de los niveles máximos de contaminación ambiental por O₃, CA, se define como la fluctuación de los mismos niveles máximos de contaminación ambiental en cada una de las zonas, debida a cambios en las características meteorológicas el Valle de México.

En este caso tanto la composición como la fluctuación, están referidas a la meteorología por lo que la composición de los niveles máximos de contaminación por O₃, es la razón que existe entre la variación de la meteorología M en cada una de las zonas, y su variación en el Valle; es decir:

$$CA = \frac{A M (J < n)}{A M (J < n)} \quad \text{III.4}$$

usando III.2

$$= \frac{\sum_r \sum_k a_k \Delta F_k(\theta)}{\sum_j \sum_k a_k \Delta F_k(\theta)}$$

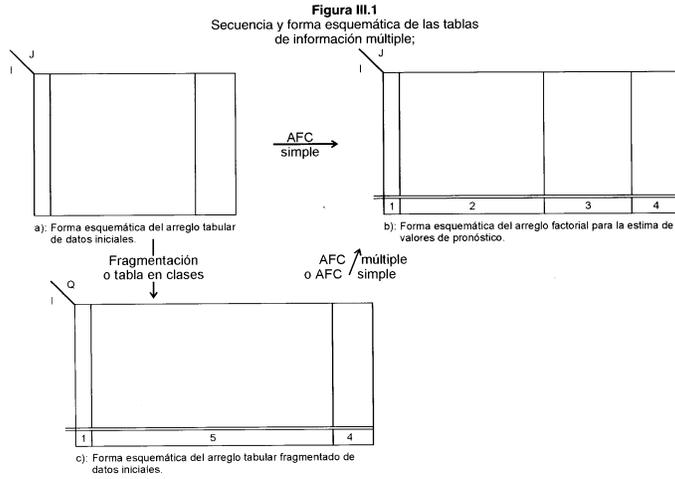
III.5

donde:

$j = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, \theta$ y $r < j$
 con j y k definidas anteriormente, r número de zonas geográficas de manera que $1 < r < j$

El modelo estadístico-matemático, nos permite determinar la calidad del aire en base a la meteorología, la que influye en la concentración de contaminantes en el Valle de México.

La implementación y validación analítica del modelo, se realiza en base a un conjunto de rutinas informáticas que permiten, en forma inmediata, la recuperación de la información (de las variables seleccionadas), la aplicación del método estadístico-mate-



Observaciones: 1 y 2 representan el tiempo y la información meteorológica, los cuales son conocidos según el escenario elegido. 5 son las clases de la información meteorológica 2; pueden ser conocidos si se conoce la información meteorológica. 3 son los valores factoriales obtenidos después de aplicar un análisis factorial a la información inicial y 4 son los valores a conocer o estimar.

mático a la información previamente tabulada, las gráficas de los valores resultado para la variable a predecir, así como la retroalimentación del sistema.

Principales resultados

La metodología aplicada en el desarrollo del modelo estadístico-matemático, nos ha permitido obte-

ner conclusiones y resultados año por año estudiado, así como en forma global el estudio en conjunto de la información de 1988 a 1992.

En este resumen ejecutivo, presentaremos solamente los resultados que el análisis estadístico de la información en conjunto arroja, desde 1988, sólo 61.42% de las ocasiones se han presentado inversiones térmicas en el Valle de México. La mayor frecuencia de capas de mezcla se presenta entre los 2 000 m y los 2 250 m sobre el nivel del suelo.

Una característica de la atmósfera del Valle de México, es su humedad relativa constante, lo que pretendidamente puede influir en la disminución de los índices de contaminación. En superficie, 75.66% de las ocasiones se tiene una humedad relativa que va de 60% al 80%. A los 500 milibares (mb), los papeles se invierten ya que 75.65% de tal humedad relativa es menor o igual a 40 por ciento.

Las direcciones del viento presentan esquemas diferentes a lo largo de todo el espacio atmosférico. En superficie, los vientos son del este, a los 700 mb son del sur, entre los 500 mb y los 300 mb, son del oeste.

En relación a las velocidades del viento, en superficie, se ha encontrado que en 81.59% de los casos, la velocidad es menor o igual a 2.0 m/s con una media de 1.1 m/s a 700 mb, su media es menor o igual a 3.1 m/s donde las velocidades de 2.0 m/s se presentan en 41.92%. La velocidad aumenta a 7.4 m/s en promedio a 500 mb y en los 300 mb, la velocidad promedio del viento es ya de 12.79 m/s.

En la zona noroeste sólo 37.83% de las concentraciones han estado en el nivel no-satisfactorio. En la zona noreste 32.7% de las concentraciones pertenecen al mismo nivel. En la zona centro, 47.87% de las concentraciones son también del nivel no-satisfactorio. En la zona sureste, 59.27% de las concentraciones han sido no-satisfactorias y en la zona suroeste, 58.19% son concentraciones no-satisfactorias.

El O₃ de la zona centro aparece correlacionado con las restantes zonas geográficas.

Jerárquicamente, la estructura arbórea agrega comportamientos muy estructurados. Una rama con-

tiene ausencia de inversiones térmicas y de corrientes de chorro, pertenecientes a las épocas veraniegas de cada año, así como las entradas de aire frío en la altura. Otra de las ramas contiene la presencia de inversiones térmicas, la presencia de corrientes de chorro en la altura y en los niveles bajos, las que ocasionan las tolvaneras en el Valle de México, así como la entrada de masas de aire frío en superficie.

El plano factorial primario, es la relación de grandes velocidades del viento a 300 mb sin dirección definida aparentemente, con altas intensidades y humedades bajas a 700 mb, las que se contraponen a la ausencia de inversiones térmicas.

Una conclusión importante, es que todos los análisis anteriores indican que, en general, las inversiones térmicas no tienen necesariamente una influencia determinante en la ocurrencia de concentraciones elevadas de O₃ en la Zona Metropolitana de Ciudad de México

El modelo matemático ha sido aplicado en dos vertientes, Información meteorológica no transformada; es decir, aplicación del modelo sobre datos brutos o iniciales, e Información meteorológica transformada; es decir, aplicación del modelo sobre datos fragmentados en clases, y cada una de éstas admite tres escenarios:

Escenario 1: (el óptimo)

Repetición de valores del último día; del cual se conozcan los valores reales, al día siguiente y realizar todo el proceso. Si se desea, en lugar de repetir los valores se pueden utilizar los promedios históricos, ya sea del mes, de la estación o de todo el año.

Escenario 2: (el menos confiable)

Hacer regresiones multidimensionales de cada uno de los factores, respecto al tiempo, colocar esos valores de pronóstico y aplicar el método.

Escenario 3: (el más confiable)

Al momento de *conocer los valores reales de la meteorología, aplicar el método.*

Lo más significativo de los resultados obtenidos al aplicar el método descrito sobre los valores máxi-

Ejemplo:
Fecha: 24/Sep/ 1996

Concentración de ozono (ppm)/MECA					
Prognosis	0.164/144	0.115/104	0.191/166	0.219/189	0.190/165
Calidad	NS	NS	NS	NS	NS
Observado	0.185/161	0.055/50	0.195/169	0.222/191	0.186/162
Calidad	NS	NS	NS	NS	NS
Dif. (MECA)	17	-54	3	2	-3

Significado:
Prognosis: Valor calculado por el método
Observado: Valor medido por aparatos de la RAMA
Dif.: Diferencia en valor absoluto entre prognosis y calculado
NS: No satisfactorio

mos de concentración en ppm de O₃ en el Valle de México, son los residuos centrados y reducidos calculados entre el valor leído y el obtenidos o pronosticado al realizar el análisis de regresión.

Se obtuvo un 58.47% de residuos negativos y un 41.52% de residuos positivos; es decir, los pronósticos están un 58.4% arriba del valor que se presentara!

MÉTODO DE PRONÓSTICO PARA EL ESMOG FOTOQUÍMICO

*Toshimasa Oohara
The Institute of Behavioral Sciences, Japan*

Hacia principios de 1970, en los alrededores de grandes metrópolis de Japón como Tokio y Osaka, se generó el esmog fotoquímico y hasta la fecha sigue siendo un problema ambiental grave. En los alrededores de Tokio, la máxima concentración en el año del oxidante fotoquímico (Ox) (gran parte de éstos es el ozono) tendió a la baja hasta 1981. Sin embargo, posteriormente volvió a tomar una tendencia a la alza, llegando a la máxima densidad local entre 180 y 250 partes por billón (ppb) (después de 1991 el valor máximo alcanzado fue de 247 ppb). Por otro lado, los días en que alcanzó un nivel mayor a 120 ppb fueron entre 20 y 60 días en el año.

Según los datos de Organización Mundial de la Salud/Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (1992), las ciudades que tienen altos niveles de concentración de ozono fotoquímico son: México, Distrito Federal; Los Ángeles; San Paulo y Tokio. En la Ciudad de México, se generan concentraciones mayores de los 300 ppb con bastante frecuencia mientras que en Los Ángeles, el nivel máximo alcanzado en 1990 fue de 300 ppb. En San Paulo fue de 100 a 280 ppb entre 1980 y 1990.

Por lo tanto, observamos que los niveles de la Ciudad de México son especialmente altos. Los niveles de contaminación de Tokio son mayores a los de San Paulo y un poco más bajos que los de Los Ángeles.

En las principales ciudades del Japón, se ha utilizado un modelo de pronóstico con el objetivo de definir previamente si se llegara a dar una situación de contaminación con altas concentraciones por esmog fotoquímico.

A continuación se presentan la situación actual de estos modelos de pronóstico y los que actualmente se están desarrollando.

- I. Modelo de Pronóstico de Esmog Fotoquímico
 1. Pronóstico a Corto Plazo (Pronóstico previo)
 2. Pronóstico a largo plazo
- II. Métodos de Pronóstico por Experiencia y por Estadísticas
 1. Hoja de Revisión, Hoja de Flujo
 2. El Modelo estadístico de la Prefectura de Chiba
 3. El Sistema de Operación Experimental de la Dirección de Medio Ambiente
- III. Métodos de Pronósticos Físicos
- IV. Pronóstico y Métodos de Operación en Emergencias

I. Modelo de Pronóstico del Esmog Fotoquímico

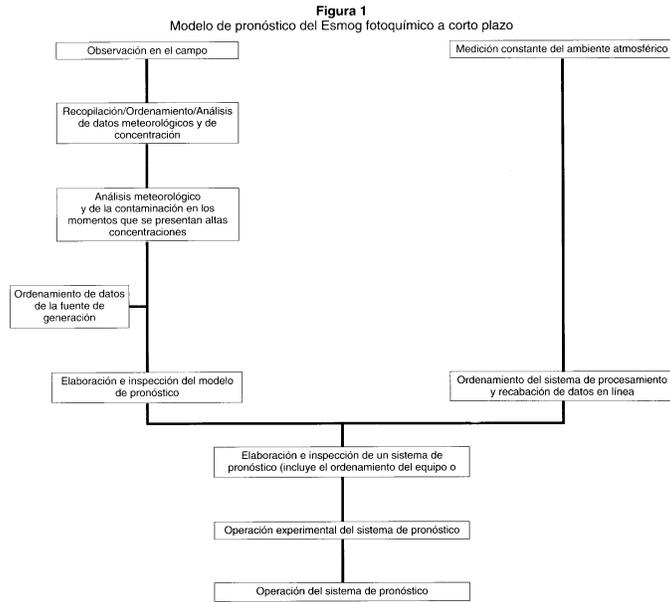
Quando hablamos del pronóstico del esmog fotoquímico, podemos pensar en dos casos. Uno es el caso cuando no existen cambios especiales en la situación de emisión de elementos contaminantes primarios (óxidos de nitrógeno, NO_x) y compuestos orgánicos volátiles (VOC) que pueden predecir las áreas y la concentración aproximada en que se va a generar el esmog fotoquímico. A esto le denominamos pronóstico a corto plazo del esmog fotoquímico (pronóstico previo). Este tiene como objetivo disminuir las emisiones de las fuentes y prevenir daños por la contaminación dando previo aviso a escuelas e instituciones. Este método se utiliza en Japón en diversos municipios así como en la Dirección General del Medio Ambiente donde se operan pruebas de sistemas de pronóstico en áreas amplias.

El otro caso es en el que se pronostica: a) cómo afectará al esmog fotoquímico los cambios en los elementos primarios de contaminación a futuro y b) qué tanto se deben reducir las emisiones para que el esmog fotoquímico sea menor. Este tiene como objetivo el estudio de estrategias de control de oxidantes. A diferencia del anterior, se le denomina

pronóstico a largo plazo. En el pronóstico a largo plazo, a través de registros físicos y químicos del fenómeno, se traza un modelo de característica no lineal entre los elementos contaminantes primarios y secundarios (esmog fotoquímico), afectados por los factores de reacción fotoquímica y meteorológicos.

En general, para modelos de pronóstico a corto plazo, es más común el uso de métodos estadísticos, basados en la experiencia ya que es necesario calcular los resultados en un tiempo corto por lo que es

muy difícil de pronosticar el clima y la concentración de la contaminación a través de un modelo físico. En cambio el modelo de pronóstico a largo plazo tiene como objetivo captar los cambios de concentración no lineales que acompañan a los cambios de emisiones, se utiliza un método basado en la física. Sin embargo, recientemente, se han iniciado algunas pruebas que abrirán camino al pronóstico a corto plazo a través del uso de modelos físicos. Los procedimientos comunes para elaborar un modelo de pronóstico a corto plazo están mostrados en la figura 1.



II. Métodos de Pronósticos Estadísticos y Basados en las Experiencias

Como un método de pronóstico estadístico y basado en la experiencia de la concentración del Ox fotoquímico del mismo día o del día anterior, están los métodos de hoja de revisión, hoja de flujo, análisis de regresión múltiple, y el análisis discriminante entre otros.

Aquí presentaremos los métodos de pronóstico que actualmente operan en los municipios o que están operando experimentalmente en la Dirección General del Medio Ambiente.

1. Hoja de Revisión, Hoja de Flujo

Se analiza la situación meteorológica característica de cuándo se presentaron concentraciones altas de Ox; basados en esos resultados se establecen las condiciones meteorológicas bajo las cuales se presentan con mayor facilidad éstas. Se ordenan en una hoja de revisión de flujo y en base a los datos meteorológicos predichos o reales, se predice el nivel de contaminación por Ox. Como elementos meteorológicos se utilizan: la iluminación; temperatura máxima; vientos (velocidad de los vientos, brisas de la tierra o del mar, tipos de vientos); estabilidad atmosférica (gradiente de temperatura potencial, altura de inversión térmica) y visibilidad. El cuadro 1 muestra un ejemplo de una hoja de revisión. Cuando

Cuadro 1
Ejemplo de una hoja de revisión

1)	Que la presión gradiente sobre la superficie del mar a las seis de la mañana sea menor a 3 milibar.
2)	Que la velocidad de viento sobre tierra a las nueve de la mañana sea menor a 2.5 m/s en caso de ser brisa del mar y en los otros casos que sea menor a 4.0 m/s.
3)	Que la velocidad del viento sobre tierra al medio día sea menor a 5.0 m/s independientemente de la dirección del mismo.
4)	Que la velocidad promedio del aire sea menor a 3.0 m/s en las capas de hasta 500 m en el aire a las nueve de la mañana hasta las 12 del día.
5)	Que no haya lluvias continuas de las nueve de la mañana hasta las 12 del día.
6)	Que la temperatura a medio día sea mayor de 23 °C entre junio y septiembre, y mayor de 27 °C entre los meses de julio y agosto.
7)	Que la cantidad de iluminación solar total del día sea mayor a 200 cal/día.

se satisfacen algunas o todas estas condiciones se diagnostica que se presentará una situación de alta concentración de Ox. También existe un método en el cual se les otorga ciertos puntos a cada condición y se diagnostica la alta concentración a través del total de puntos obtenidos.

2. Método Estadístico de la Prefectura de Chiba

Como método estadístico presentaremos el modelo que opera en la Prefectura de Chiba. En esta prefectura, a partir de marzo de 1996 se ha venido utilizando el pronóstico de un día antes y del (mismo) día utilizando un modelo físico, el cual explicaremos posteriormente. Como herramienta de soporte, también opera paralelamente un método de pronóstico que utiliza un modelo estadístico. El modelo estadístico utiliza los datos meteorológicos y de concentración que se puedan obtener antes de las nueve de la mañana del mismo día y calcula el rango máximo de la concentración de Ox y el valor máximo en 10 áreas.

El sistema de pronóstico se compone de tres submodelos: un modelo de decisión por patrón meteorológico, un modelo de pronóstico por rangos máximos de concentración y un modelo de pronóstico por concentraciones máximas por áreas.

Modelo de Decisión por Patrón Meteorológico

Es un modelo para definir los patrones meteorológicos relacionados a la presentación de concentraciones altas de Ox. Se analizan los componentes principales de los datos de distribución a través del tiempo y espacio, de elementos meteorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura, iluminación) y a través de los resultados del Análisis de Cluster y basado en los valores de los componentes principales se dividen en nueve patrones meteorológicos.

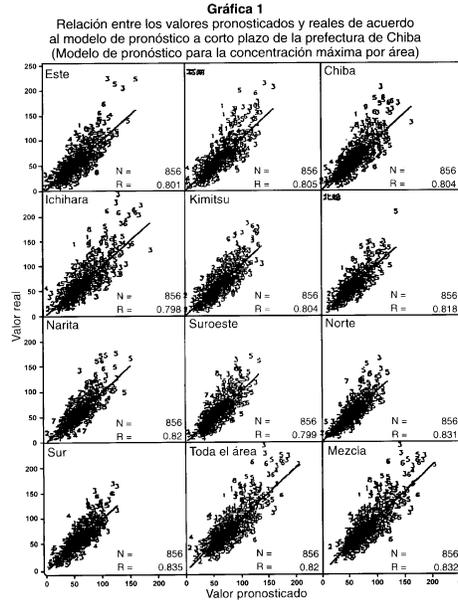
Modelo de Pronóstico por Rangos Máximos de Concentración.

Es un modelo que predice el rango del valor de la máxima concentración de Ox. Se basa en un modelo discriminador de funciones donde las concentraciones (Ox, NOx, etc.) obtenidas hasta las nueve de la mañana y las calificaciones de los componentes principales de los elementos meteorológicos se utilizan como variables explicatorias. La tasa de preci-

sión (días acertados/días totales) para más de 120 ppb de este modelo, la tasa de discriminación de alta concentración (los días con pronóstico de alta concentración, los días que realmente presentaron alta concentración/días con pronóstico de alta concentración) y la tasa complementaria de alta concentración (los días reales con alta concentración el número de días con pronóstico de alta concentración/número de días reales que presentaron alta concentración) fueron respectivamente de 84%, 90% y 88 por ciento.

Modelo de Pronóstico por Concentraciones Máximas por Áreas.

Es un modelo que pronostica el valor máximo por área de concentración de O₃; se basa en un modelo de análisis de regresión múltiple de patrones meteorológicos por variables explicatorias (se condensan en tres patrones). En la gráfica 1 se muestra la situación correspondiente de los valores pronosticados y los reales. En cada área se ha logrado el 0.80 de coeficiente de correlación múltiple pero es difícil pronosticar la presentación de concentraciones radicalmente altas.



El Sistema en Operación Experimental de la Dirección General del Medio Ambiente

En la Dirección General del Medio Ambiente se desarrollo la Red en Línea de Información de Contaminación Fotoquímica del Aire (PAPION por sus siglas en inglés) que recaba y distribuye en tiempo real y en línea los datos ambientales y resultados de los pronósticos que pueden ser útiles para las medidas de emergencia contra la contaminación fotoquímica del aire en Tokio y sus alrededores. Actualmente se está operando experimentalmente mientras se le agregan mejoras al sistema sobre la marcha. Los horarios de operación de este sistema están en el cuadro 2. El pronóstico del día anterior se realiza a las 16:30 del día anterior y el pronóstico del día se hace desde las 9:30 a las 18:30 en un intervalo de 30 minutos. El flujo de procesamiento del modelo de pronóstico a un día se muestra en la figura 2. El modelo de pronóstico se compone por los siguientes cinco submodelos.

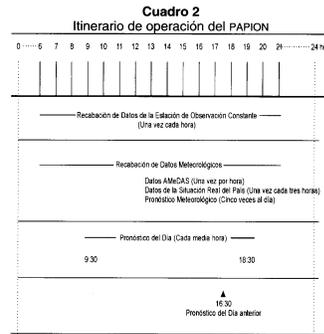
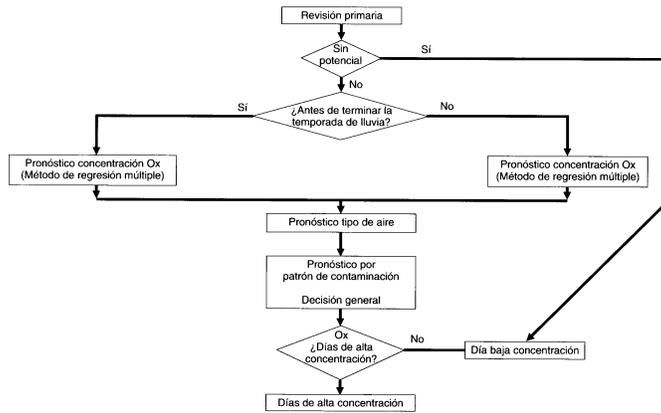


Figura 2
Flujo de procesamiento del modelo de pronóstico a 24 horas PAPION



Modelo Primario de Revisión.

De los datos de temperatura, clima, etc., del día objeto de pronóstico se predice si se va a presentarse una concentración alta (de más de 120 ppb) en el área objeto con el método de hoja de revisión.

Modelo de Pronóstico de Concentración de Oxidantes Fotoquímicos.

Se predice la concentración máxima de Ox del día, en el área objeto de pronóstico, a través del análisis de regresión múltiple.

Modelo de Pronóstico por Patrones del Aire.

Basados en la presión atmosférica en la tierra, dirección y velocidad del viento, se pronostica a cuál de los siete tipos de patrones de aire analizados previa y estadísticamente corresponde.

Modelo de Pronóstico por Patrón de Contaminación
A través del resultado del pronóstico por patrones del aire se calculan por áreas las posibilidades de que se presenten altas concentraciones.

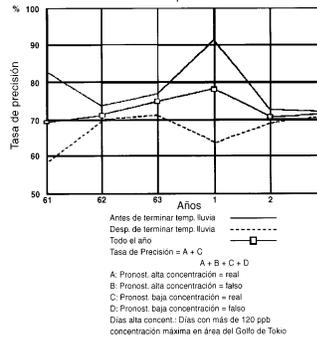
Modelo de Pronóstico General

Tomando en cuenta los resultados anteriores, se decide si finalmente se va a generar alta concentración o no. En la gráfica 2 se muestra la tasa de precisión de pronóstico un día antes. Se ha podido lograr una tasa de precisión anual de aproximadamente 70% en cada año.

III. Métodos de Pronóstico Físicos

En la prefectura de Chiba, se opera de manera experimental desde marzo de 1996, un sistema de pronóstico de un día antes y del (mismo) día utilizando un modelo físico. Este sistema pronostica un día antes o el mismo día la concentración de Ox utilizando modelos físico/químicos como corrientes atmosféricas/dispersión/reacción, etc., basándose en los datos recabados en tiempo real a través de los datos del pronóstico meteorológico de datos numéricos y las líneas de telémetro de la Dirección General de Meteorología en cuanto a: concentración de contaminación del aire; medición meteorológica (más de 100 estaciones de medición); datos del origen de generación (65 plantas grandes). La figura 3 muestra los flujos de proceso del sistema de pronóstico. El sistema utiliza un modelo tridimensional a mesoescala de valores meteorológicos (Modelo

Gráfica 2
Método de pronóstico del esmog fotoquímico a corto plazo

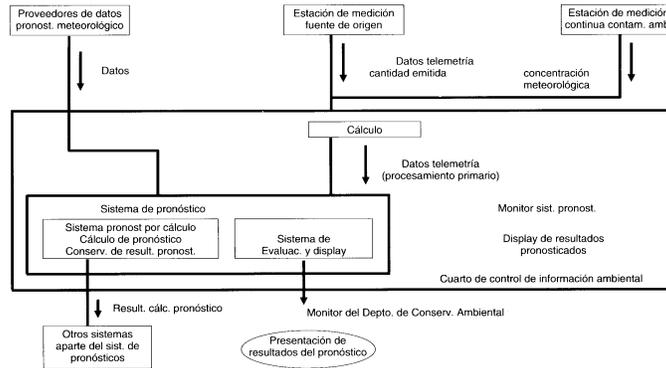


Mesoescala: MM) y un modelo de transportación química (MTQ) que incluye la reacción fotoquímica. El MM provee al MTQ con datos meteorológicos. Los lugares de corrientes atmosféricas de gran escala se calculan con el modelo de pronóstico meteorológico a corto plazo de la Dirección General de Meteorología. Por otro lado, la distribución de concentraciones Ox tridimensionales se calculan por el MTQ. Para el establecimiento de la concentración inicial, se utilizan los datos de concentración atmosférica ambiental recabados por las líneas de telémetro. Se pudo confirmar que el valor pronosticado y el valor real son bastante similares a través del resultado de una inspección al sistema donde se tomaron los 15 días que registraron mayor concentración en el año de 1994. Actualmente, el sistema está en operación de prueba con una estación de trabajo tipo paralelo que tiene capacidad de cálculos a alta velocidad.

IV. Método de Operación

Como medida de emergencia para la presentación de altas concentraciones de Ox, en cada municipio está establecido anunciar oficialmente un informe de emergencia. La concentración de oxidan-

Figura 3
Composición del sistema de pronóstico de la Prefectura de Chiba



tes que sirve de parámetro para el anuncio oficial del informe de emergencia es el informe de prevención para 0.12 partes por millón (ppm) e informe de emergencia para 0.24 ppm, el informe de emergencia grave es para 0.40 ppm. Al ser anunciados, los municipios solicitan, exhortan u ordenan medidas de reducción de emisión de NOx a las plantas principales y/o piden la cooperación a ciudadanos en general para que se limiten en el uso de automóviles, deportes o actividades físicas fuertes por parte de los niños y alumnos. La cancelación del informe de emergencia se emite cuando el área objeto del mismo llegan a un nivel inferior de Ox en todas sus estaciones de medición y ya no existe el peligro de alcanzar niveles que requieran anunciar nuevamente los boletines de emergencia.

Por otro lado, en varios municipios, se establece que el estado de emergencia se debe anunciar oficialmente cuando surja el peligro de que la concentración de Ox exceda el nivel límite de emergencia. Por ejemplo en la prefectura de Kanagawa, dividen los pronósticos en tres tipos: el pronóstico del día anterior, el pronóstico del mismo día y el pronóstico especial. El pronóstico del día anterior, a las 17 horas, el pronóstico del día a las 10 horas y el pronóstico especial, a todas horas. Y se cancela cuando se aceptan que han desaparecido las condiciones que puedan generar contaminación por Ox. Ahora, en la realidad, existen pocos casos en el cual se les solicitan medidas concretas para reducir las emisiones a las plantas en las etapas de pronósticos.

SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA MODELOS ATMOSFÉRICOS SIGMA

*Francisco Zamora
IBM México*

Abstract

Mexico City is among the most polluted cities in the World. In early 1992, the City Government (DDF), the National University (UNAM) and the IBM Scientific Center (Mexico), launched a project whose main purpose was to provide government planners and decision makers a tool to model the pollutants dispersion in the area.

SIGMA is a Geographic Information System (GIS) coupled with an Air Quality Model. It has four components: wind, emission, dispersion and geographical subsystems. The first three subsystems have specific functions that allow the user to interact with the corresponding models, input and output files, and produce previously designed outputs: either virtual or paper maps. The geographic subsystem provides the user with spatial analysis capabilities.

SIGMA contains some other variables as: location and characteristics of meteorologic stations inside the metropolitan area, population distribution and characteristics, census tracts and administrative boundaries, street networks and urban features.

SIGMA is fully operational but it is in a development stage in its use and application. The working group of SIGMA foresees the development of an integral system to handle the emissions inventory, enable short term prognostic models and communicate the results of atmospheric monitoring to the public.

Resumen

La Ciudad de México es una de las más contaminadas en el mundo, por lo que en 1992 el Departamento del Distrito Federal (DDF), la Universidad

Nacional Autónoma de México (UNAM) y el Centro Científico IBM-México, iniciaron un proyecto cuyo principal propósito fue el proporcionar una herramienta a los planeadores y tomadores de decisiones gubernamentales para modelar y comprender la dispersión de contaminantes en el área.

El Sistema de Información Geográfica para Modelos Atmosféricos (SIGMA) es un Sistema de Información Geográfica (SIG) acoplado a un Modelo de Calidad del Aire, que contiene cuatro subsistemas: vientos, emisión, dispersión y posicionamiento geográfico. Los primeros tres son modelos matemáticos con acceso a usuarios e intercomunicados entre sí y con programas de entrada y salida diseñados junto con el sistema de información geográfica para permitir el análisis espacial de resultados.

SIGMA maneja además otras variables como: la localización y características de las estaciones meteorológicas de la zona metropolitana, la distribución y características de la población, información censal, distribución administrativa, vialidades y otros datos de la infraestructura urbana.

Éste fue concluido y actualmente se diseña la estrategia para su aplicación. Además, se pretende continuar su desarrollo para incluir el manejo de los datos del inventario de fuentes de emisión, modelos de dispersión atmosférica de respuesta inmediata, y un sistema de información al público.

Antecedentes

Considerando la gran complejidad que encierra el problema de la contaminación en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM), debido a sus características meteorológicas y urbanas, el estudio

de este fenómeno resulta de gran interés académico, además de ser un tema de prioridad dentro de la agenda de las autoridades de la ciudad, quienes requieren del pleno conocimiento de esta problemática para la toma adecuada de decisiones.

Atendiendo a esta problemática, se planteó la necesidad de elaborar un programa computacional que incluyera un modelo capaz de predecir la dispersión de contaminantes en la atmósfera de la ZMCM. Para esto, se buscó la participación de una institución académica con especialistas en modelación matemática, la UNAM; autoridades gubernamentales que dispusieran de la información ambiental requerida y fuesen los usuarios del programa resultante, el DDF; y una institución con los últimos conocimientos en materia computacional que pudiesen garantizar que el producto terminal tendría los atributos más actualizados en la materia, el Centro Científico IBM.

La tarea principal del Centro Científico IBM (CC-IBM), dentro del proyecto planteado, consistió en la integración de los modelos de emisión y dispersión de contaminantes atmosféricos, dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Este proyecto revistió un especial interés científico, no sólo por la integración de modelos ambientales, sino por ser una de las primeras aplicaciones de un SIG en México.

Introducción

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica han producido avances significativos en varios aspectos tecnológicos en las últimas tres décadas, principalmente porque amplían considerablemente el universo de aplicaciones de esas técnicas.

Actualmente, debido a la existencia de un gran número de paquetes de software que permiten almacenar información cartográfica junto con la información alfanumérica provista dentro de un sistema computarizado, es posible realizar búsquedas especializadas, análisis de información, generar reportes y producir mapas de alta calidad, con un mínimo de esfuerzo por parte del usuario y a gran velocidad.

Las ventajas de estos sistemas de representación resultan muy atractivos cuando se combinan con la

salidas tradicionales de otras herramientas matemáticas programadas dentro de los actuales sistemas de cómputo. La introducción de modelos de calidad del aire, dentro de un SIG, permitirá al usuario general y a especialistas en estudios ambientales realizar las siguientes actividades:

- Almacenar los datos de entrada y salida de los modelos en un Sistema de Información Geográfica.
- Generar mapas de alta calidad para el análisis, o presentación de los resultados de los modelos
- Emplear los recursos de administración de datos del SIG interactivamente con los modelos acoplados
- Emplear las interfaces de comunicación con el usuario, desarrolladas para los SIGs, para lograr la comunicación entre diferentes modelos acoplados
- Además, existen funciones particulares de los SIGs que pueden emplearse para realizar análisis espacial de los datos producidos por los modelos matemáticos interconectados.

Diseño conceptual

La tarea inicial para el diseño de SIGMA fue la selección de la metodología de diseño a seguir. Para esto, se consideraron tres posibles niveles conceptuales dentro del sistema: Modelo Geográfico o Metasistema, Sistema de Información y Sistema de Cómputo.

Metasistema. Los sistemas convencionales de información usados como soporte de tareas productivas o de administración se diseñan dentro del marco conceptual propio de la institución u organización empresarial que los aplicará. Sin embargo, considerando las aplicaciones tan variadas de un SIG, el único denominador común, y por tanto la base conceptual del diseño, deberá ser el modelo geográfico en el que se basa su estructura. Esto es, SIGMA será aplicado para la administración de recursos naturales, manejo de censos y planeación urbana y regional, por lo que todas las variables, atributos, datos, procesos y otra información que se maneje, será derivada o integrada a través de un modelo geográfico considerado como el metasistema.

Los elementos básicos para la definición de un sistema empresarial convencional incluyen el esque-

ma lógico y físico de los procesos de producción y administración. Similarmente, para el desarrollo de un SIG será fundamental el conocimiento de los modelos geográficos usados y de los procesos de análisis y evaluación para los que se empleará. Por lo tanto, como primera etapa del diseño conceptual del SIG, se debe realizar un análisis de los requerimientos del usuario para establecer las características de los modelos geográficos a emplear.

Sistema de Información. Los componentes del SIG, como los de todo sistema de información, deben definirse en estrecha colaboración con el usuario final. Los subsistemas de captura, adquisición, conversión y estructura de las bases de datos y los de análisis, uso y administración de la información deben ser discutidos detenidamente como parte del diseño conceptual del SIG. Además, estos subsistemas deberán ser constantemente adaptados y probados de acuerdo con las necesidades del usuario durante cada una de las etapas subsiguientes de desarrollo del Sistema de Información Geográfica.

Sistema de Cómputo. El diseño y análisis del sistema de cómputo depende fuertemente de la tecnología disponible. La configuración del sistema, el diseño de la base de datos y los esquemas de operación y producción serán indirectamente definidos por el metasisistema y el sistema de información.

Como posiblemente ya lo haya notado el lector, esta metodología tiene algunas diferencias con el diseño de un sistema gerencial convencional, debido a que las características de las aplicaciones del SIG exigen que la información de los modelos geográficos y los modelos matemáticos de dispersión de contaminantes se manejen explícitamente. Además de que para el diseño de SIGMA, fue importante considerar algunas variables adicionales que garantizaran la aceptación y uso de este tipo de sistema; el desarrollo cultural y organizacional de los usuarios últimos del sistema son un factor decisivo para la aceptación del mismo.

A continuación se enumeran algunos aspectos de importancia considerados dentro de la etapa de desarrollo y aplicación del sistema:

Propósitos y metas. El propósito fundamental fue el diseño de un SIG capaz de admitir, almacenar,

procesar, analizar y producir salidas de los datos georeferenciados que requiere y arroja un modelo de calidad del aire. El sistema resultante debe, entre otras propiedades, ser amigable, permitiendo al usuario no experto identificar fácilmente la información necesaria; explotar las posibilidades de análisis comparativo y despliegue de resultados.

Durante la primera etapa del proyecto, las metas específicas de este proyecto fueron:

1. Desarrollar la herramienta de interacción entre los modelos de viento, emisión y dispersión de monóxido de carbono (CO) manejados por los investigadores de la Universidad Nacional Autónoma de México.
2. Recopilar y almacenar toda la información geográfica y cartográfica requerida por estos modelos.
3. Generar la representación gráfica de los resultados de los modelos.
4. Diseñar un sistema de preguntas y acceso a la información gráfica y alfanumérica contenida dentro del Sistema de Información Geográfica para Modelos Atmosféricos.
5. Diseñar el sistema de consulta para el personal del DDF que permitiese la elaboración de reportes y mapas mediante diálogos y pantallas amigables.

Modelo Geográfico. La representación de la ZMCM, de relevancia para la modelación, incluye la topografía física (orografía), la topografía urbana (altura de edificios e infraestructura urbana), trazado de vías de comunicación (vialidades primarias y secundarias), estadísticas sociales y económicas de la población, localización de fuentes fijas de emisión de contaminantes (chimeneas), y estaciones meteorológicas existentes en la zona.

A cada uno de estos elementos se les asocia un valor específico y juega un papel distinto dentro de las bases de datos. Por ejemplo, la altura del terreno es importante como dato de entrada para el modelo de vientos y para la visualización tridimensional de la zona de estudio; mientras que la información social y económica resulta de interés como dato de referencia para el análisis de los datos de salida del modelo de dispersión, al establecer el impacto de la concentración local de un contaminante sobre la población de esa zona.

Entre los datos técnicos más importantes de este modelo es conveniente mencionar:

- El área de estudio se definió sobre un mapa 1:250 000 dentro de un rectángulo de 39x45 kilómetros cuyos vértices se localizan en la zona 14 con coordenadas UTM: (470 000, 2 130 000), (470 000, 2 175 000), (509 000, 2 130 000) y (509 000, 2 130 000) respectivamente. Estos vértices están localizados en: Magdalena Contreras, Chalco, Atlatongo y Cuautlalpan, respectivamente.
- Para manipulación de la información y propósitos de representación, se adoptó una malla uniforme dentro de esta zona de tres kilómetros por lado.
- A pesar de que el modelo de viento requiere de una malla de solución más fina (de un kilómetro), se unifico esta salida y la de los otros modelos empleados, a la malla de despliegue de tres kilómetros.
- El sistema incluye los siguientes niveles de información:
 - Topografía
 - Vialidades primarias y secundarias
 - Localización de fuentes fijas
 - Estructura urbana, por manzana
 - Imagen de satélite del área de estudio (SPOT pancrómica)
 - División política y administrativa de la zona e información censal.

SIGMA tiene cuatro subsistemas: subsistema de modelación de vientos (SV), subsistema de evaluación de emisiones (SE), subsistema de modelación de dispersión de contaminantes (SD), y subsistema de análisis geográfico y consulta.

Las funciones básicas del SV permiten al usuario: ejecutar el modelo de interpolación de vientos, para lo que debe acceder la información meteorológica de la ZMCM; suministrar al modelo de dispersión de contaminantes el campo de vientos requerido para tal modelación; así como el obtener una representación gráfica y/o geográfica del campo de viento de la zona.

El SE permite correr el modelo de emisiones de CO₂, enviar los resultados de este modelo al mode-

lo de dispersión de contaminantes, recuperar la salida de este modelo y presentarlo gráfica y geográficamente.

La función del SD es dar acceso al usuario al modelo de dispersión atmosférica para obtener las concentraciones horarias para diferentes capas de la atmósfera; este subsistema interactúa con las diferentes bases de datos y con el subsistema que produce las salidas gráficas del Sistema de Información Geográfica para Modelos Atmosféricos.

Finalmente, SGC es la parte de SIGMA que maneja las funciones estándares del Sistema de Información Geográfica a disposición del usuario. Esto se hace posible a través de un formato modular; los resultados de los modelos son manipulados por este subsistema para desplegarlos en forma georreferenciada, para realizar análisis y responder preguntas preestablecidas dentro del sistema.

Al diseñar SIGMA se plantearon tres posibles soluciones técnicas para lograr la integración del Sistema de Información Geográfica con el sistema formado por los modelos matemáticos seleccionados:

1. Comunicar los dos sistemas mediante archivos de migración para los datos de entrada y salida
2. Usar un SIG como soporte para comunicación con el usuario y para intercomunicación entre los modelos y la representación geográfica.
3. Desarrollar los modelos dentro del Sistema de Información Geográfica.

La tercera opción fue considerada la más adecuada, sin embargo la tecnología en el momento de iniciar el proyecto, y el tiempo destinado para su realización no permitieron realizar esta opción.

La opción adoptada consistió en hacer uso de la tecnología existente y crear una interfase, empleado un software comercial, ARC/INFO, para conectar los modelos matemáticos seleccionados a un SIG que será la base de comunicación con el usuario. Esto es, la segunda opción de solución planteada.

Actualmente, SIGMA está en completa operación, y los manuales de usuario y reportes sobre las bases técnicas concluidos, sin embargo es necesario realizar una etapa de calibración en la cual se alimenten

a SIGMA datos actuales de emisión de CO, y comparar los resultados obtenidos contra los valores que proporciona la Red Automática de Monitoreo Ambiental (RAMA). Esta etapa de prueba se ha diseñado para responder a dos premisas fundamentales:

1. La interfase entre el SIG y los modelos debe ser lo suficientemente flexible como para permitir el acoplamiento de diferentes modelos de dispersión atmosférica. Esto ha sido parcialmente logrado, pero se diseña una segunda etapa del proyecto para realizar el acoplamiento entre modelos diferentes.
2. Además de las ventajas que obtendrá el usuario al poder representar la salida de los modelos temáticos sobre referencias geográficas, SIGMA debe permitir al usuario realizar análisis espaciales de la información.

Una limitante que se presentó durante el desarrollo del sistema fue la carencia de programas de cómputo adecuados para la comunicación con el SIG. Los modelos de dispersión existentes han sido desarrollados, en su mayoría, en FORTRAN y sus salidas no son directas para su representación en un SIG. La salida tradicional de los modelos no eran bases de datos estructuradas por lo que fue necesario manipularlas para crear la interacción con el sistema de información.

SIGMA fue diseñado para el uso de especialistas en la contaminación atmosférica de la Ciudad de México. La operación del sistema se hace a través de menús que contienen iconos representativos de las diferentes funciones. La experiencia adquirida durante pruebas con los usuarios finales del sistema, demostró que el sistema es sencillo de aprender.

Los componentes del Sistema que permiten la interacción con los modelos, ofrece representaciones cartográficas de los resultados. Las representaciones cartográficas se diseñaron de acuerdo con los especialistas en la modelación, quienes a su vez conocían las necesidades de los usuarios potenciales.

El fenómeno de contaminación atmosférica que nos interesa ocurre a nivel regional dentro de una zona urbana, por lo que el área de estudio debe ser analizada cuidadosamente para ser representada adecuadamente. Por lo tanto, adquirir y estructurar la información de la Ciudad de México fue una tarea

prioritaria del proyecto. A pesar de haber múltiples fuentes de información sobre la ZMCM, no toda la información está disponible, y muy poca de ella se encuentra en forma digitalizada.

El obtener la información necesaria y estructurarla dentro de una base de datos requirió de un gran esfuerzo.

En el análisis geográfico y los componentes de la consulta, el usuario tiene acceso a todos los resultados de los modelos, puede emplear los mapas y analizar la información para responder a sus preguntas. Un ejemplo de un mapa que representa una sección de la ciudad usando una imagen del satélite SPOT con información de fuentes fijas de emisión e información censal.

Como se mencionó anteriormente, SIGMA está en operación, pero aún está en una etapa final de comparación contra datos reales. La aplicación del Sistema ha sido muy limitada debido a:

1. La interacción entre usuarios y desarrolladores fue escasa durante la etapa de desarrollo, además de haber cambiado los usuarios finales que participaron al inicio del proyecto.
2. Existe una carencia de datos nuevos para alimentar los modelos. Los datos de meteorología y emisiones corresponden a años anteriores.
3. El modelo sólo puede predecir CO (contaminante no reactivo), cuando hay otras especies, como el ozono, que resultan de mayor interés para los tomadores de decisiones.
4. Los usuarios tienen poco conocimiento sobre los aspectos tecnológicos y conceptuales respecto a los Sistemas de Información Geográfica.

Este último punto tiene muy seria repercusión sobre la adopción de SIGMA dentro de una organización. Como es bien sabido, hay tres ciencias que se conjugan dentro de un SIG: Geografía, Ciencias Computacionales y Matemáticas, y los usuarios necesitan un conocimiento global de estas disciplinas y las posibilidades de aplicación de las herramientas que ofrece un SIG, para aceptar su adopción.

A pesar de que el usuario no requiere saber geometría computacional o bases de datos cartográficos, ciertamente necesita tener una clara idea de

las ventajas y limitaciones del sistema computacional del que hará uso. Aún más, el tomador de decisiones ambientales tiene que entender las limitaciones de la herramienta tecnológica que usará para fundamentar sus decisiones.

Comentario final

Una segunda etapa de desarrollo de SIGMA ha sido planeada, identificando al usuarios y especialistas que participaran en ella. En esa etapa se mejoraran

los modelos matemáticos empleados, haciendo énfasis en el modelo de emisiones a la atmósfera y en los sistemas de información pública.

El aspecto más interesante durante el desarrollo de SIGMA fue el lograr la integración de puntos de vistas multidisciplinarios que deberían conjuntarse para lograr una cabal comprensión de un problema complejo, la contaminación atmosférica en la ZMCM, y emplear las nuevas tecnologías para plantear nuevas alternativas de solución.

QUÍMICA DE LAS ATMÓSFERAS URBANAS

*Ma. Esther G. Ruiz S., Elba Ortiz
Instituto Mexicano del Petróleo*

Resumen

El estudio de la química de las atmósferas urbanas surge de la importancia que la alta concentración de contaminantes fotoquímicos tiene sobre la calidad del aire de las zonas metropolitanas y la necesidad de diseñar estrategias para su control.

La aplicación de los modelos de calidad del aire resultan ser benéficos en este sentido y ha dado lugar a enfocar las medidas de control de los precursores: óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, a estrategias que no sólo dependen del control de la cantidad en masa, sino de la reactividad individual que presentan los compuestos en la atmósfera.

Las escalas de reactividad se han determinado tomando en cuenta distintos mecanismos cinéticos de reacción que a través de reacciones individuales para especies reales o prototipo dan cuenta de la formación de los contaminantes fotoquímicos. Tradicionalmente estas escalas contienen grandes incertidumbres asociadas con la falta de datos experimentales precisos y la variación de la cinética debido a las condiciones locales. Estas complicaciones se traducen en dificultades para el control de productos comerciales que llegan al consumidor. La normatividad en los EUA sugiere que se establezca el grado de reactividad de los productos comerciales como altamente reactivos, reactivos o no reactivos dependiendo de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles que provoque su contenido.

En México, el Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) ha aplicado los modelos de calidad del aire para el estudio del efecto en la formación de ozono debido a la reformulación de combustibles o a la presencia de los componentes del gas LP en el aire en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Esta aplicación se ha extendido a la evaluación de distintas estrategias de control, los resul-

tados muestran que, para el caso de la ZMCM, no existe una acción única para mejorar apreciablemente la calidad del aire sino que debe ser la suma de acciones concertadas.

Reconocimientos

Los resultados y el entendimiento del comportamiento del ozono en la ZMCM fueron obtenidos por investigadores del IMP dentro del Proyecto Estudio Global de la Calidad del Aire en la Ciudad de México.

La atmósfera natural

La atmósfera natural, está compuesta por nitrógeno y oxígeno principalmente en las conocidas concentraciones de casi 80 y 20%. En realidad, estas proporciones son 78.01% y 20.95% y el uno por ciento restante está constituido por argón y dióxido de carbono. En proporciones diez mil veces menores, es decir, concentraciones medidas en partes por millón, encontramos otros compuestos como los llamados gases nobles y algunos óxidos gaseosos provenientes principalmente de la combustión natural. Se encuentran también en proporciones variables principalmente vapor de agua, que va de 0 a 4% dependiendo del área geográfica que se considere; en la composición de la atmósfera natural, también en proporciones de partes por millón (ppm), encontramos ozono como se ve en la tabla 1 y trazas de compuestos orgánicos y compuestos de oxidación.

En la tabla 1 es fácil apreciar que el ozono aumenta su concentración según se encuentra más lejos de la superficie de la tierra presentando un máximo de concentración, hasta de 3 ppm, a la altura de la estratosfera que se encuentra cerca de los 25 km de altitud. El gradiente de concentración se debe a que el ozono es un compuesto muy reactivo y en la cercanía del suelo reacciona con los otros compuestos que ahí se encuentran; es impor-

Tabla 1
Composición de la atmósfera natural

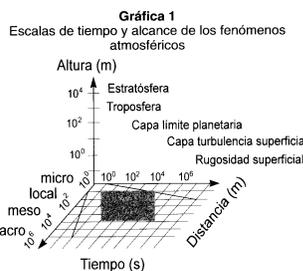
Compuestos permanentes	% vol.	Conc. (ppm)
Nitrógeno, N ₂	78.01	—
Oxígeno, O ₂	20.95	—
Argón, Ar	0.93	—
Dióxido de carbono, CO ₂	0.03	—
Neón, Ne	—	18.2
Helio, He	—	5.2
Kriptón, Kr	—	1.1
Xenón, Xe	—	0.1
Hidrógeno, H ₂	—	0.5
Metano, CH ₄	—	2.0
Oxido nítrico, N ₂ O	—	0.5
Monóxido de carbono, CO	—	7.1
Compuestos variables		
Vapor de agua	0-4	—
Ozono, O ₃	—	0-0.07 (sup) 1-3 (20-30 km)
Ácido nítrico, HNO ₃	—	0-0.01
Ácido sulfhídrico, H ₂ S	—	0.002-0.02
Dióxido de azufre, SO ₂	—	0-0.02
Amoniaco, NH ₃	—	Trazas
Dióxido de nitrógeno, NO ₂	—	Trazas
Oxido nítrico, NO	—	Trazas

tante señalar que las concentraciones que alcanza en la cercanía del suelo son más de 10 veces menores que en la estratosfera. Más arriba de los 25 km el ozono se destruye por la absorción de la radiación solar de alta energía.

Las normas de calidad del aire, es decir, las concentraciones de gases que se consideran satisfactorias y que no perjudican el bienestar general, establecidas alrededor del mundo para el ozono son aproximadamente 0.1 ppm. En las atmósferas urbanas, los conglomerados poblacionales contribuyen con emisiones a la atmósfera propias de las actividades que se desarrollan. Éstas son principalmente óxidos gaseosos provenientes de la combustión, vapor de agua y partículas, al exceder las concentraciones establecidas en las normas les calificamos como contaminantes.

Los fenómenos de contaminación urbana suceden dentro de la escala local o regional (hasta decenas de kilómetros) con tiempos que van de

segundos hasta varias horas, incluso días, como se ve en la gráfica 1; aunque su permanencia está influenciada fuertemente por los fenómenos meteorológicos.



En la tercera escala de la figura anterior, que corresponde a la altura, tenemos representadas las capas de la atmósfera y vemos que los procesos de mezclado, que son los que influyen en la dispersión de los contaminantes se reducen a unos cuantos cientos de metros.

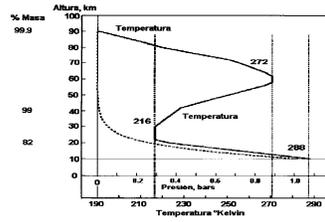
El ozono

El ozono cambia su concentración a lo largo del día y el máximo que alcanza depende de las concentraciones de sus precursores, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos, y la meteorología.

El ozono es una molécula de tres átomos de oxígeno, estable pero muy reactiva que fue "descubierto" por Schönbein en 1840. Su existencia fue demostrada con pruebas químicas en 1858; posteriormente, en 1881, Harley lo detectó en la estratosfera al advertir que era el responsable de filtrar la radiación solar de 300 nm. Este hecho se confirma en 1921 por Fabry y Buisson mediante determinaciones ópticas.

En la figura 1 se ilustra la estructura de la atmósfera y la variación de sus propiedades con la altura, en particular, la temperatura y la presión.

Figura 1
Estructura vertical de la atmósfera



El comportamiento de la temperatura en la figura 1, presenta un gradiente negativo o uno positivo. A partir de la superficie de la tierra el gradiente negativo significa que el aire se enfría con la altitud hasta llegar a una cierta altura, a esta región se le llama troposfera; la siguiente región hacia arriba donde el aire se calienta con la altitud es la estratosfera. La frontera entre estas dos regiones es la tropopausa.

La presión decrece exponencialmente con la altura y sus cambios fuerzan que la mayor parte de la masa esté concentrada en los primeros 20 kilómetros más cercanos a la superficie, de hecho 99% de la masa de la atmósfera se encuentra abajo de 30 kilómetros, y más de 4/5 de ésta, está abajo de 12 kilómetros en la troposfera. El decremento exponencial de la masa con la altitud es debido a la expansión de los gases causada por un decremento en presión por la altitud.

Hartley determinó una fuerte absorción de luz que se presentaba a partir de 20 km hacia arriba y eso se identificó con la presencia del ozono como se ve en la figura 2.

En 1930 Chapman propone un ciclo de reacciones químicas para explicar la presencia de ozono (O₃) en la estratosfera:

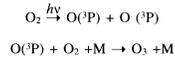
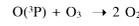
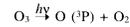
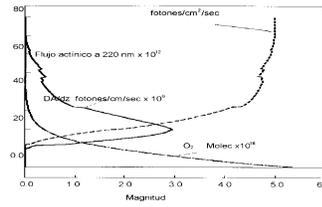
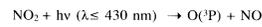


Figura 2
Absorción de la energía solar en la estratosfera

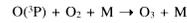


donde $h\nu$ es la energía de la radiación solar, h es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la luz

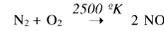
A finales de 1940 en Los Angeles, Haagen-Smit, investigando los daños producidos por la contaminación del aire en plantas, propuso:



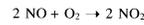
como el origen de O^{(3)P}, el cual produce posteriormente ozono



En las áreas urbanas, durante los procesos de combustión, el oxígeno del aire actúa como oxidante del nitrógeno:



Una vez que el NO es emitido por las fuentes de combustión, este compuesto se oxida a NO₂ mediante el proceso siguiente:

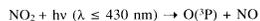


Cuando la concentración de NO es de 100 ppm, el tiempo de vida media del NO es de 0.5 horas, las emisiones se diluyen rápidamente y esta concentración se reduce hasta valores que oscilan entre 5-50

ppb. Sin embargo, un proceso de conversión de NO a NO₂ rápido, a concentraciones atmosféricas, es:



Si se combinan las reacciones anteriores, tenemos un ciclo

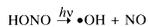
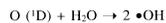


se ve que el O₃ producido por las dos primeras reacciones es consumido en la tercera reacción; sólo habrá acumulación de O₃ si se presenta un proceso de oxidación de NO a NO₂ que compita con ésta.

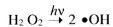
Fotoquímica de los constituyentes menores

Los radicales libres eran conocidos desde principios de 1930, aunque no fue hasta 1967 que se convirtieron en el centro de atracción como parte de los mecanismos fotoquímicos cuando Geiner realizó la primera medición de la reacción del radical hidroxilo (•OH) con alcanos. La primera explicación científica sobre la formación de O₃ urbano se propone hasta 1970.

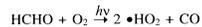
En general, los mecanismos fotoquímicos producen directamente radicales libres, y en pocos pasos, por ejemplo, los radicales hidroxilo son producidos por las siguientes reacciones:



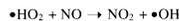
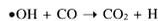
y



Existen otras reacciones que inician la cadena de formación de radicales libres, por ejemplo, la fotólisis de COV produce radicales nuevos •HO₂ de la siguiente manera:

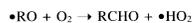
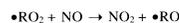
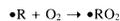


En 1969 y 1970, dos grupos de investigación en los Estados Unidos, el de la Universidad de Pensilvania dirigido por Heicklen y el de la Ford Motor Company dirigido por Winstock, presentaron un mecanismo que involucra a los radicales libres •OH y •HO₂ como los responsables de la oxidación de compuestos orgánicos y de NO a NO₂. Básicamente, el proceso sugerido por estos dos grupos puede ser ilustrado por el siguiente mecanismo químico:



Geiner había demostrado que el •OH era capaz de separar hidrógenos de los alcanos. En consecuencia en presencia de oxígeno los radicales alquilo podían producir radicales peróxido •RO₂.

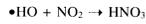
En presencia de NO estos radicales peróxido pueden producir NO₂ y radicales alcoxilo •RO. El destino de estos radicales depende de la estructura de la cadena alquilo, por ejemplo, aquellos compuestos orgánicos que contengan un hidrógeno sobre el átomo de carbón adyacente al radical oxígeno formarán aldehídos o cetonas. Se formará el radical •HO₂ después de que una molécula de oxígeno separe dicho hidrógeno. Una generalización del mecanismo de reacción de •OH con los hidrocarburos o compuestos orgánicos volátiles (COV) es la siguiente cadena de reacciones:



Esta cadena de reacciones se conoce como propagación de los radicales libres, ya que la última reacción vuelve a formar el radical •OH para reiniciar el ciclo. Cada molécula de compuesto orgánico oxida al menos dos moléculas de NO, el número de moléculas oxidadas repercute en cuánto ozono se

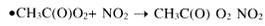
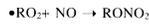
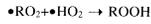
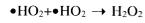
forma por el consumo de una cantidad de hidrocarburo.

La propagación de los radicales concluye cuando éstos son incorporados como productos de reacción estables. La reacción de terminación más frecuente es:



La trascendencia de esta reacción en la terminación de la propagación de los radicales libres es que elimina del ciclo, no sólo los radicales libres $\bullet\text{HO}$ sino también al NO_2 , justo cuando existe una mayor abundancia de radicales disponibles.

Otras reacciones de terminación importantes son:



donde ROOH es un peróxido orgánico, RONO₂ es un nitrato orgánico y los últimos dos productos de reacción son nitratos orgánicos de peróxido, el primero de éstos es conocido como PAN. La permanencia en la atmósfera de los nitratos de peróxido depende de un equilibrio térmico y en este sentido actúan como reservorios de NO₂, teniendo el doble papel de parte terminal del ciclo o generadores de NO₂.

Las reacciones del tipo radical-radical, como los primeros dos pasos mostrados en el ejemplo anterior, se presentan más frecuentemente una vez que se han eliminado los NO_x, de lo contrario estos radicales reaccionan con el NO en las cadenas de propagación.

Dado el papel central que desempeñan las reacciones del radical $\bullet\text{OH}$ frente a los compuestos orgánicos, se han desarrollado a nivel laboratorio un gran número de estudios detallados para determinar

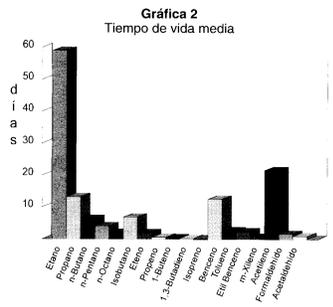
las constantes de velocidad frente al $\bullet\text{OH}$ y los radicales peróxido formados por cada reacción, así como sus reacciones subsecuentes frente al NO.

La velocidad con la cual reacciona un compuesto orgánico en la atmósfera, particularmente con el radical $\bullet\text{OH}$, determina en parte qué tan rápido este compuesto orgánico convierte NO a NO₂ y por tanto, qué tan rápido esto repercute en la formación de ozono.

Es por esta serie de procesos que, responder a la pregunta ¿Cuánto O₃ se produce debido al consumo de una cantidad de hidrocarburo? sea una tarea complicada.

Tratando de responder esta pregunta, Seinfeld, Middleton y otras personas consideran la velocidad de reacción de los hidrocarburos con el radical $\bullet\text{OH}$ como un criterio para evaluar su reactividad. En la gráfica 2, se aprecia que compuestos como el etano, benceno y acetileno permanecen en la atmósfera más tiempo sin reaccionar con los radicales $\bullet\text{OH}$ que el isopreno, el buteno o el butadieno, es decir, estos tres últimos compuestos presentan una mayor reactividad frente al $\bullet\text{OH}$.

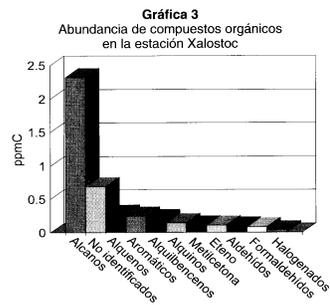
Para construir la gráfica 2 se utilizaron las constantes de reacción de cada hidrocarburo con respecto al $\bullet\text{HO}$, a partir de una concentración de radicales



•HO promedio de 5×10^6 radicales por cm^{-3} para atmósferas contaminadas (Finlayson y Pitts, 1986)¹.

En la gráfica 3 se presentan los compuestos orgánicos volátiles más abundantes en una muestra de aire recolectada durante noviembre de 1994 en la estación Xalostoc, agrupados en las diferentes familias químicas. Se puede observar que los compuestos más abundantes son del tipo alcano, seguidos por los alquenos y los compuestos aromáticos. Si se consideran los datos de la gráfica 2 se puede decir que la mayor parte de los COV presentes en la atmósfera para la localidad de Xalostoc tienen una vida media larga frente al radical hidroxilo, sin embargo, existen en menor proporción compuestos, como los alquenos que reaccionan rápidamente frente al radical •OH.

Cabe señalar que si bien la escala de reactividad propuesta por Seinfeld, Middleton y demás nos proporciona ideas claras al tratar de manera independiente a cada una de las reacciones químicas de los hidrocarburos con el radical •OH, su aplicación es limitada ya que no contiene información del medio ambiente en el cual se llevan a cabo los ciclos de reacciones.



¹ En cinética química el tiempo que tarda en reaccionar la mitad de la concentración inicial de un compuesto dado se define como el tiempo de vida media de dicho compuesto.

Por otra parte, Carter desarrolló el concepto de reactividad incremental, IR, para establecer la contribución de la variación en la concentración de cada una de las especies orgánicas presentes en la mezcla atmosférica en la producción de ozono. La determinación de la IR se realiza mediante experimentos en los cuales se varía la concentración inicial de cada orgánico y se mide la concentración máxima de ozono alcanzada. Los experimentos se realizan para cada una de las especies bajo condiciones de ambiente controlado, ya sea en cámaras de esmog o con modelos que incluyen la cinética de reacciones incluidas en mecanismos químicos establecidos; cualquiera de estos procedimientos permite atribuir una reactividad incremental a cada uno de los COV. En la gráfica 4 se muestran los resultados correspondientes a los 15 compuestos más abundantes, en orden decreciente, de la ZMCM. Se puede notar que la escala de Carter señala que a pesar de las mayores concentraciones de los alcanos, estos compuestos no son los que tienen mayor repercusión en la formación del ozono.

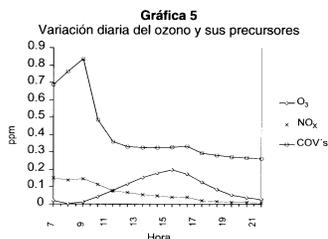


Se debe enfatizar que en la reactividad incremental no es la masa de ozono producida la que determina la importancia fotoquímica sino la sensibilidad de la reactividad a un cambio pequeño en la concentración de una especie, bajo condiciones ambientales específicas (por ejemplo: COV/NOx, altitud, latitud, temperatura, etc.). En este caso debe señalarse que la escala de Carter no es de aplicación

universal ya que está formulada para una relación COV/NOx determinada, y hay evidencia de su dependencia a esta relación.

Ejemplos de la formación de ozono

Actualmente la manera en que se estudia la formación de ozono en las zonas urbanas es a través de los modelos de la calidad del aire que predicen la concentración de éste y otros compuestos incluidos en los mecanismos de reacción bajo un conjunto dado de condiciones, que incluyen: los inventarios de emisiones, las condiciones de un día determinado y la meteorología de la zona en estudio. En la gráfica 5 se muestran los perfiles de variación de NOx, O₃ y COV predichos por el mecanismo químico Lurman Carter y Coyner dentro del modelo de calidad de aire CIT en su versión de trayectoria para un día de simulación.



El modelo predice una evolución de la concentración de ozono similar a la observada a través de las mediciones continuas de este compuesto. Esto es, temprano por la mañana la concentración de ozono es despreciable y comienza a formarse a una hora en que ha habido emisiones de sus precursores, los NOx y COV, mediante las reacciones fotoquímicas desencadenadas por la radiación solar; el ozono presenta un máximo cerca de las tres de la tarde, mostrando un decremento cuando la radiación solar disminuye. Los perfiles de los NOx y COV muestran una clara dependencia con las condiciones meteorológicas, apreciándose una relación inversa con respecto a la capa de mezcla, sin embargo es notable la disminución de la concentración de los

NOx aún cuando la capa de mezcla se estabiliza, lo que se puede atribuir a las cadenas de reacciones descritas anteriormente. En esta gráfica también contrasta las concentraciones de COV y NOx que definen los regímenes de reacción en las zonas urbanas; en el caso de la ZMCM la concentración de NOx es el factor limitante y su concentración total permanece baja porque se consume tan pronto como se forma. Es evidente que la relación COV/NOx presenta valores que varían entre 20 y 50, muy distinto a las que se presentan en las ciudades de los Estados Unidos, donde el valor promedio es 8.

Los modelos fotoquímicos son la mejor representación científica de la no-linealidad de la química. El uso de los modelos de calidad del aire simulando la formación de O₃ permite evaluar las estrategias de control sobre sus precursores, ya que se puede asociar a cada medida de control una reducción estimada en las emisiones; y ésta, incluida dentro del inventario total, permite mediante el modelo responder la pregunta ¿Qué pasaría si ...?.

Conclusiones

Los estudios realizados en el IMP muestran que en la ZMCM un control de la masa de ambos precursores del ozono resulta ser tan importante como el control selectivo de los hidrocarburos.

El establecimiento de estrategias dirigidas al control selectivo de los hidrocarburos mediante escalas de reactividad establecidas es aplicable sólo bajo ciertas circunstancias, por lo cual deben desarrollarse índices de reactividad para cada situación, en particular para las condiciones de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

El análisis cuidadoso y multifactorial del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera puede dar lugar a definir acciones para combatir la contaminación urbana.

La presencia en la atmósfera de compuestos que terminan el ciclo de oxidación de los compuestos orgánicos, tales como los nitrato de peroxiacetilo o peróxido de hidrógeno, pudieran ser tan importantes en la fotoquímica de la Ciudad de México como el ozono mismo, por lo cual, se sugiere un mayor estudio sobre productos terminales como los mencionados.

MODELOS DE EMISIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO EN JAPÓN SIMULACIÓN DE ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Mitsuhiro Yamamoto
Experto del proyecto CENICA-INE
Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental

Abstract

During the winter season, nitrogen dioxide concentrations in the big Japanese cities are above the recommended levels, and therefore all possible control techniques are of most interest to Japanese scientists and governmental groups.

For choosing and designing control techniques of air pollution and reduction of nitrogen oxides emissions in Japan, several mathematical models and experimental simulations have been carried out to define clearly the polluted areas and the location and contribution of point sources.

Resumen

La concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en las grandes ciudades del Japón sobrepasa, en invierno, la norma de calidad del aire, por lo que las medidas para disminuir sus emisiones son un tema de gran importancia entre la comunidad científica y gobernantes de ese país. Para diseñar los programas de control de la contaminación del aire, relativos a reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno, se ha realizado una detallada simulación de las emisiones de estos gases, para establecer claramente las zonas en las cuales se sobrepasan las normas, así como la localización y la contribución de las fuentes puntuales de emisión.

Antecedentes

Las condiciones meteorológicas y geográficas de la región de estudio son determinantes para establecer las características del modelo a desarrollar. El presente estudio fue realizado para la prefectura de Chiba

(figura 1), por ser una de las zonas de mayor actividad industrial en el Japón y donde existe desde hace muchos años una red de monitoreo atmosférico.

Es importante mencionar que los resultados que se obtuvieron con el modelo descrito a continuación, fueron comparados contra la norma del medio ambiente del Japón, la cual establece dos niveles máximos diarios de concentración: uno de 0.04 partes por millón (ppm) para zonas limpias y otro de 0.06 ppm para zonas definidas como problemáticas. La definición de estas zonas es establecida por las autoridades ambientales, pero en ningún caso el valor promedio diario debe rebasar la norma correspondiente más de 2% del año (esto es siete días máximo).

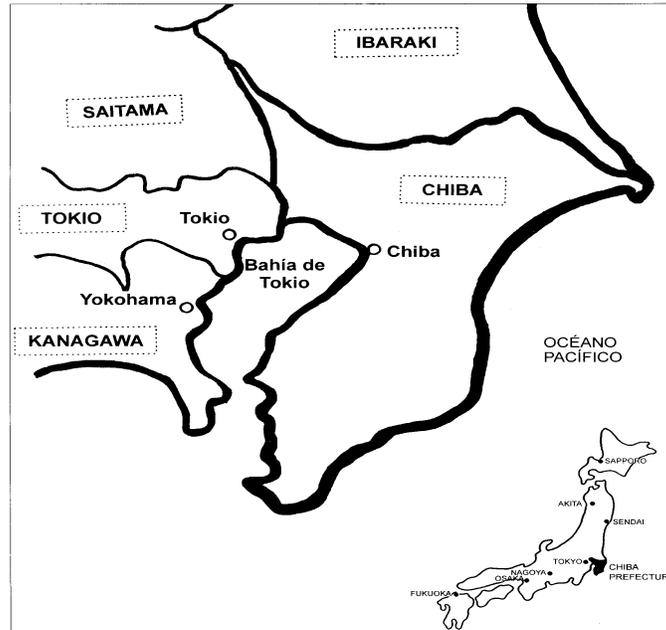
La gráfica 1 muestra la variación de la concentración promedio diaria y promedio anual, de 1976 a 1985 para la zona de estudio. Estos datos, junto con la información de fuentes de emisión y meteorología se emplearon para diseñar el modelo de simulación.

Modelos de simulación

Este modelo de calidad del aire, como muchos otros, se construyó con base en tres modelos que interactúan, proporcionando cada uno de ellos una pieza específica de información. Estos modelos son: modelo de emisiones, modelo meteorológico (campo de vientos) y modelo de dispersión.

En la figura 2 se presenta el diagrama de flujo del modelo desarrollado para la simulación de NO₂ en el cual, además de los modelos internos, se observan los bloques de información que deberán

Figura 1
Mapa de la prefectura de Chiba

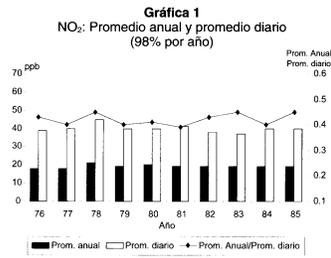


alimentarse. Se requiere de tres tipos de información:

- Información de emisiones
- Información meteorológica representativa
- Concentraciones medidas de bióxido de nitrógeno.

Modelo de emisiones

Para obtener un modelo estadístico de emisiones e interrelacionar los resultados de éste con los del modelo meteorológico, se analizan los datos disponibles clasificándolos por: estaciones del año (prima-



vera, de marzo a mayo; verano, de junio a agosto; otoño, de septiembre a octubre; e invierno, de noviembre a febrero), y horas del día (mañana, de 6 a 11; tarde, de 11 a 17; noche, 17 a 23; y madrugada, de 23 a 6 horas).

Los datos incluidos dentro del modelo que aquí se plantea corresponden a:

- Fuentes puntuales fijas: Industria.
- Fuentes móviles: Emisiones de automóviles particulares, transporte de carga y servicio, barcos y aviones.
- Fuentes fijas de área: Emisiones de zonas urbanas.

Fuentes puntuales fijas

Fuentes industriales. Las emisiones totales para fuentes fijas de tipo industrial se estiman empleando el diagrama de flujo que se presenta en la figura 4. De acuerdo con este diagrama, es necesario inicialmente localizar e identificar el tipo de fuente, obtener valores característicos de emisión para cada uno de los equipos identificados y estimar el valor total de las emisiones. Según este procedimiento las emisiones de NO₂ de fuentes fijas industriales son las mostradas en la tabla 1.

Fuentes de calefacción. En tercer lugar se evaluó la emisión de este contaminante a partir de otro tipo de fuentes fijas de emisión, las cuales pueden ser manejadas como fuentes de área (zonas urbanas) o

Tabla 1
Emisiones de NO₂ de fuentes industriales

Método de estimación	Número de equipos	Emisión (m ³ /h)*
Telemetría	430	2 134.3
Investigación	3 309	445.3
Encuestas	185	14.8
Declaración de equipos	344	14.8
Total	4 268	2 609.2

* Estas mediciones fueron hechas a condiciones estándar: 20 °C y 1 atm.

como fuentes puntuales. En este modelo se empleó el método indirecto de estimación, ejemplificado en la figura 4, y está basado en la cuantificación del consumo energético de la zona urbana y el tipo de equipo de calefacción empleado en la zona. De acuerdo a esta información y los factores de emisión para los equipos y combustibles que se manejan, se obtuvieron los siguientes datos:

Tipo de fuente	m ³ /h			
	1985	1990	1995	2000
Casas habitación	154.8	168.8	184.1	202.8

Fuentes móviles

Vehículos para transportación terrestre. El proceso para estimar las emisiones vehiculares es más complejo que para fuentes fijas. Para ese caso, el total de emisiones se calculó multiplicando factores de emisión vehiculares por el recorrido total de los vehículos existentes. Pero tanto los factores de emisión como el recorrido total requieren primero ser estimados.

Para estimar el factor de emisión se analiza estadísticamente la información disponible sobre: emisiones vehiculares, características del parque vehicular, encuestas sobre origen-destino y distribución vehicular (figura 5), y a partir de esos datos se obtiene la fórmula general:

$$FE = A v^2 + B v + C$$

en donde FE es el factor de emisión (g/km), v la velocidad del vehículo (km/hr) y los parámetros A, B y C, según el tipo de vehículo, se presentan en la tabla 2.

Multiplicando el factor de emisión correspondiente por el recorrido total de cada vehículo, calculado según el esquema mostrado en la figura 6,

Figura 2
Modelo de simulación de NOx

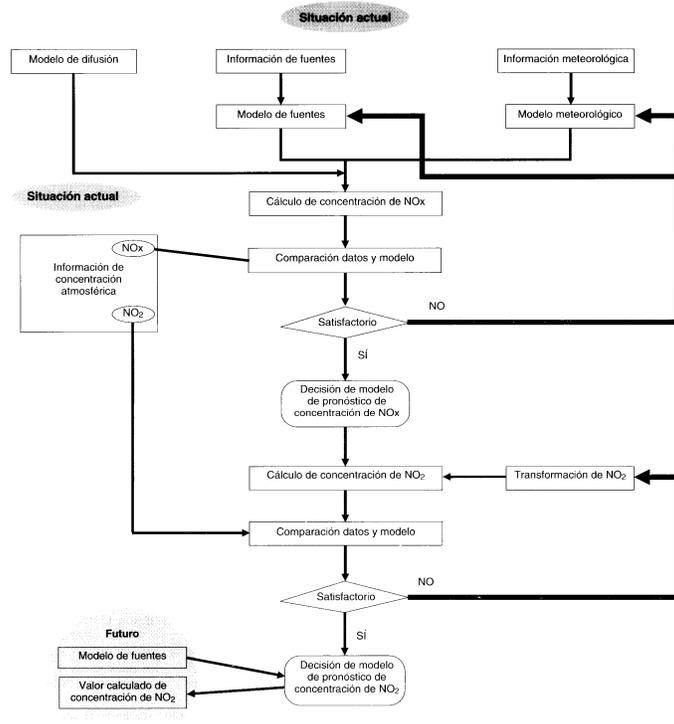


Figura 3
Flujo de preparación de los datos de la emisión de fuentes fijas

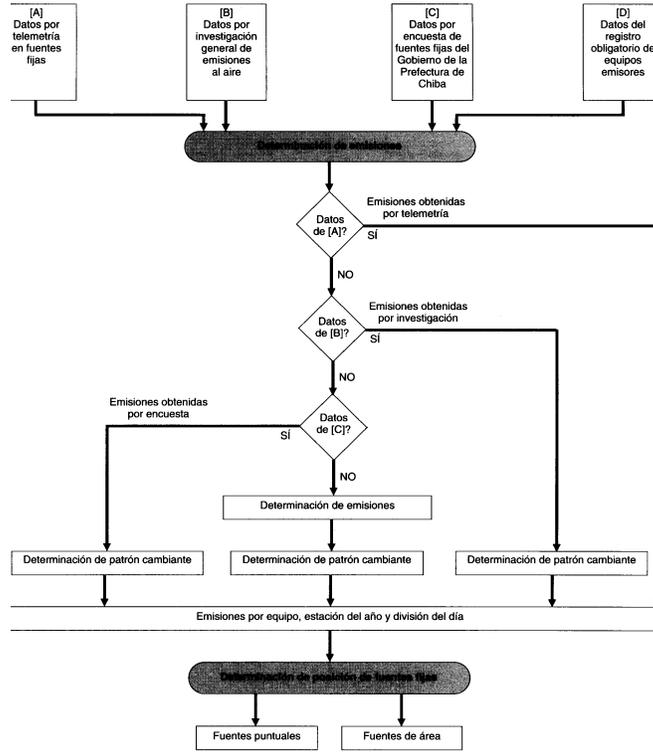


Figura 4
Diagrama de flujo de emisiones de NOx en casas habitación y edificios

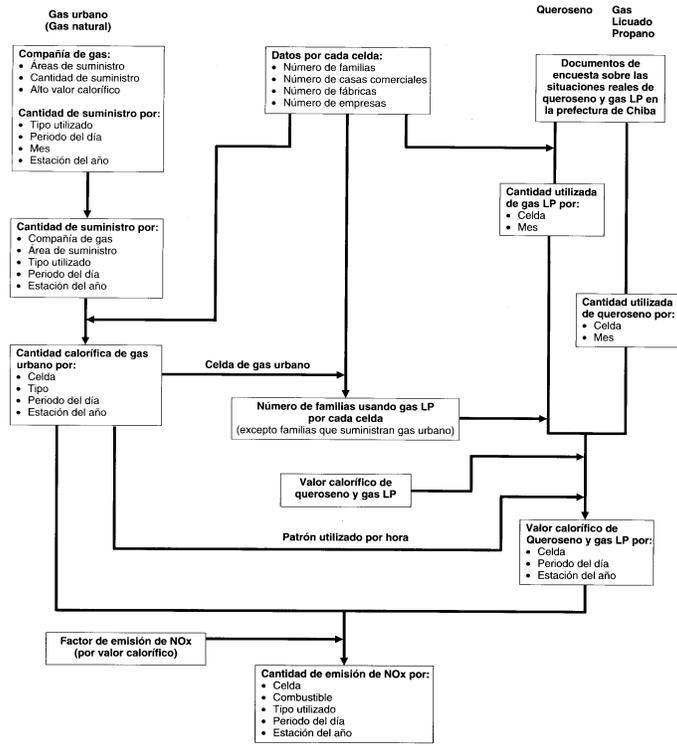


Tabla 2
Factor de emisión por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	A	B	C
Automóvil compacto	0.7834E-04	-0.2218E-02	0.3185E+00
Automóvil familiar	0.2837E-03	-0.6923E-02	0.6173E+00
Autobús	0.1909E-02	-0.2167E+00	0.1059E+02
Pick up	0.1171E-03	-0.7734E-02	0.9488E+00
Camioneta de volteo	0.3858E-03	-0.2624E-01	0.1782E+01
Camioneta guayin	0.3423E-03	-0.2313E-01	0.1278E+01
Camioneta de dos o más ejes	0.1450E-02	-0.1690E+00	0.8526E+01
Vehículos pesados	0.1072E-02	-0.1174E+00	0.5914E+01

es posible obtener la emisión correspondiente al parque vehicular. Los valores de emisión para fuentes móviles para 1985, 1990, 1995 y año 2000, se presentan en la tabla 3.

Transportación marítima. Dentro de la prefectura de Chiba es de gran importancia considerar otros dos tipos de fuentes móviles: los transportes marítimos y aéreos. La prefectura de Chiba forma parte de la bahía de Tokio y cuenta con dos puertos de gran importancia, el de Chiba de 40 kilómetros de costa y el Kisarazu que posee 10 km.

Figura 5
Flujo para elaborar el factor de emisión de vehículos

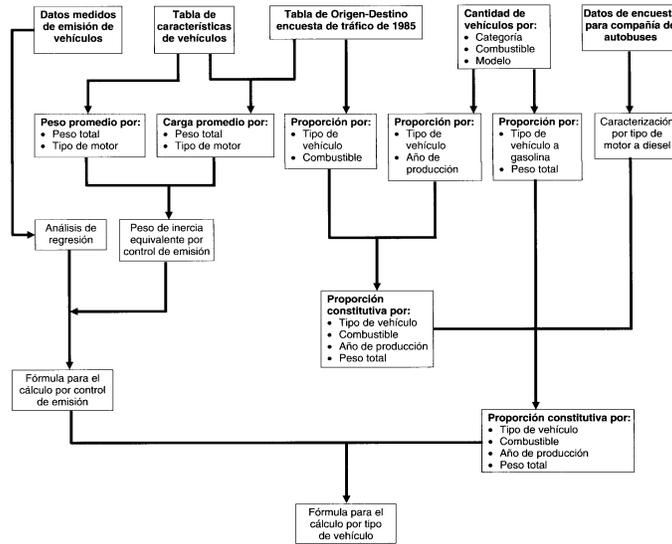


Tabla 3
Valores de emisión para fuentes móviles

Tipo de vehículo	m ³ /h			
	1985	1990	1995	2000
Automóvil compacto	9.2	6.3	6.5	7.3
Automóvil familiar	391.1	375.9	394.2	445.9
Autobús	96.8	130.9	133.8	140.5
Pick up	67.2	83.7	64.3	57.5
Camioneta de volteo	117.6	105.3	92.2	97.5
Camioneta quayín	107.9	94.0	62.4	55.0
Camioneta de dos o más ejes	479.9	615.9	635.1	735.6
Vehículos pesados	75.0	90.7	92.8	110.2
Total	1 344.7	1 502.7	1 481.3	1 649.5

En forma similar a la metodología establecida para la estimación de emisiones vehiculares, se procedió a evaluar los NO₂ que emiten las embarcaciones en la bahía de Tokio (figura 7), y de acuerdo a los factores de emisión disponibles y los registros de embarque de los puertos marítimos se obtuvieron los siguientes datos:

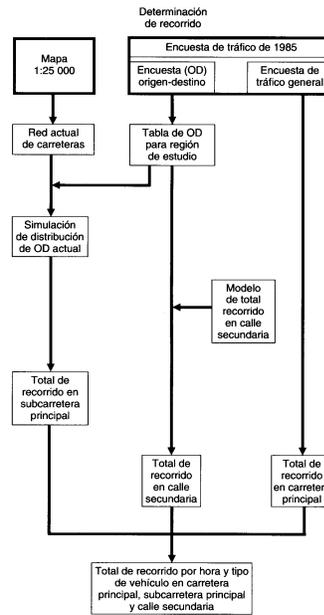
Tipo de fuente	m ³ /hr/año			
	1985	1990	1995	2000
Barcos	317.1	376.5	407.6	438.7

Transportación aérea. Finalmente, se debió considerar para contar con un inventario adecuado de las emisiones de la zona, la existencia del mayor aeropuerto del Japón, y uno de los mayores del mundo, dentro de la región de la prefectura de Chiba: el Aeropuerto Internacional de Narita, el cual presenta movimiento continuo y para el cual se empleó la metodología mostrada en la figura 8, para evaluar sus emisiones de dióxido de nitrógeno.

Es importante mencionar que para esta evaluación se cuentan con datos exactos de llegadas y salidas de aviones, así como con las características de cada aeronave y los factores de emisión correspondientes. De acuerdo con esta metodología se evaluaron las emisiones a 1985 y se pronosticaron los valores para 1990, 1995 y el año 2000. Esto es:

Tipo de fuente	m ³ /hr/año			
	1985	1990	1995	2000
Aviones	71.3	95.0	117.4	139.9

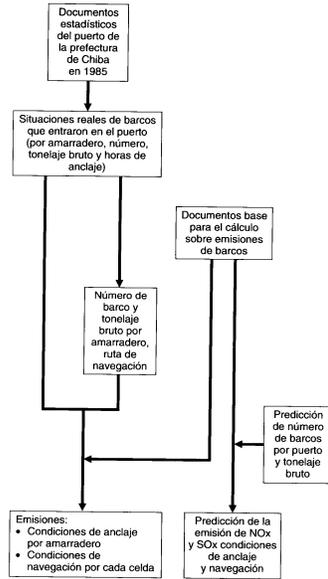
Figura 6
Estimación de emisiones vehiculares



Las emisiones calculadas con los métodos anteriores forman parte del inventario total de NO₂ de la zona, el cual arroja los siguientes totales:

Total de emisiones en la prefectura de Chiba	Nm ³ /hr/año			
	1985	1990	1995	2000
	4 497.1	4 948.4	5 076.6	5 357.5

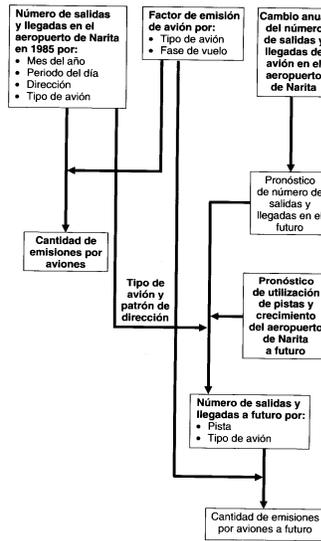
Figura 7
Diagrama de flujo de emisiones en barcos



Modelo meteorológico

Para conocer el campo de vientos en la zona y poder emplear este como dato de entrada, junto con los datos de emisión, al modelo de dispersión de contaminantes, se revisó la información meteorológica disponible y se realizó un análisis estadístico de los mismos para establecer la existencia de correlaciones vectoriales entre las estaciones de medición.

Figura 8
Diagrama de flujo para calcular emisiones por aviones



Al realizar este análisis fue posible dividir la zona de estudio en 17 bloques y seleccionar en cada uno la estación meteorológica más representativa. Una vez realizada esta selección se calcula la velocidad del viento a diferentes alturas (h), siguiendo una relación exponencial:

$$\text{velocidad del viento (h)} = \text{velocidad de referencia} \left(\frac{h}{\text{altura de referencia}} \right)^p$$

en la cual el exponente p depende de las condiciones reinantes de estabilidad atmosférica.

Modelos de dispersión

Para la estimación de la dispersión de las emisiones contaminantes determinadas y el cálculo de concentraciones puntuales a nivel del piso dentro de la zona de estudio, se emplearon varios modelos matemáticos de dispersión atmosférica, cada uno de ellos seleccionado según el tipo de fuente (puntual, lineal o de área) y las condiciones meteorológicas del bloque (calma o con viento). Las fórmulas empleadas son de dominio común y aquí sólo se resumen sus condiciones de aplicación:

Tipo de fuente	Calma	Viento
Fuente puntual	Puff	Pluma para fuente puntual
Fuente lineal	Vehículos JEA en viento débil y calma	JEA
Fuente de área	Aviones Puff para fuentes puntual continua	Pluma para fuente puntual continua
	Puff para fuente de área	Pluma para fuente de área

JEA = Agencia Ambiental del Japon.
Puff = Emisión súbita de contaminantes.

Resultados

En la figura 9 se presenta el mapa de la prefectura de Chiba y los rangos de concentración de dióxido de nitrógeno estimados de acuerdo a los modelos arriba presentados. En esta figura es posible observar que las concentraciones más elevadas se presentan en la zona norte de la bahía de Tokio, cerca de la ciudad, en donde es posible observar algunos puntos que rebasan las 30 ppb de concentración de este contaminante.

Además, en la tabla siguiente se presenta la contribución de los diferentes tipos de fuentes de emisión identificados. Es importante aclarar que en esta tabla no sólo se considera la emisión estimada y presentada en tablas anteriores, sino que se incluye una columna de contribución efectiva, la cual corresponde a la concentración calculada a nivel del piso; de aquí que la contribución de las industrias (chimeneas elevadas) sea menor que su emisión.

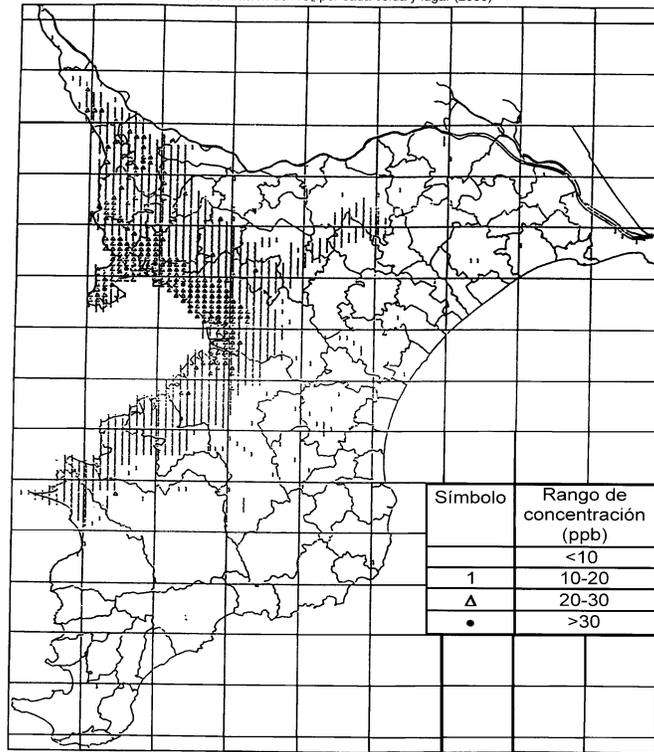
Fuente	Tasa de emisión (%)	Contribución efectiva (%)
Industria	56.7	24.7
Vehículos	30.4	55.9
Casas habitación	3.4	10.5
Bancos	7.6	1.8
Aviones	1.9	1.6
Total	100.0	100.0

Conclusiones

A partir de los métodos presentados en este trabajo es posible analizar la situación actual de las emisiones en una región geográfica y empleando los modelos de dispersión disponibles estimar las concentraciones de interés a nivel del piso.

La información anterior es básica para establecer programas de reducción de contaminantes, principalmente porque permite identificar las fuentes de emisión existentes y su contribución efectiva a la calidad del aire de la zona.

Figura 9
Concentración de NO₂ por cada celda y lugar (2000)



MODELO INTEGRAL DE LA CALIDAD DEL AIRE

*Kurt Fedra
Environmental Software Service, Austria
Rina Aguirre
Universidad Nacional Autónoma de México*

Abstract

This model is an important part of the so called GAIA initiative, which provides innovative tools and methods to promote the sustainable use of natural resources and the prevention of environmental pollution. It aims to integrate developing countries into the global information society, combining research skills established in these countries with European counterparts to facilitate the growth of experience, communication and participation in solving regional problems.

This computational tool combines into a Geographic Information System (GIS), an expert system and mathematical models to represent and to analyse, under a multimedia framework, several pollution problems as urban air pollution and deforestation.

Resumen

Este modelo es parte importante del proyecto llamado Modelo Integral de la Calidad del Aire (GAIA), el cual pretende hacer uso de las herramientas computacionales más novedosas para promover la conservación y uso racional de los recursos naturales, y la prevención de la contaminación ambiental.

Esta herramienta combina dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG), el uso de un sistema experto y modelos matemáticos para representar y analizar, en un ambiente multimedia, diferentes problemas de contaminación ambiental, como la contaminación del aire en zonas urbanas y la deforestación.

Antecedentes

El análisis y planteamiento de soluciones a problemas de contaminación ambiental mediante el uso de

modelos matemáticos es una práctica común en muchos países de Europa y América del Norte, en los cuales se han comprobado las ventajas del uso de estas herramientas como apoyo para la toma de decisiones y evaluación de alternativas.

Aunado al uso de modelos matemáticos, actualmente se emplean sistemas de información geográfica para desplegar los resultados de estos modelos y analizar, dentro de un contexto geográficamente referenciado, el significado de tales resultados. Así, la información sobre la concentración de un gas contaminante adquiere diferente dimensión cuando ésta se presenta localizada sobre una pradera deshabitada, que cuando ocurre sobre una zona densamente poblada.

El acoplamiento entre estas dos herramientas, SIGS y modelos matemáticos, es sin duda de gran utilidad para los tomadores de decisiones y, al acoplar a éstos la tecnología multimedia (audio, gráficos, video y animación), se obtiene un nuevo instrumento que rebasa en aplicación el ámbito de usuarios expertos, para alcanzar al usuario común el cual tiene ahora sistemas de comunicación que permiten la cabal comprensión de la problemática planteada.

Objetivo

El objetivo de esta iniciativa, GAIA, es crear una herramienta adecuada para el manejo de la información relacionada con la administración de recursos naturales y la capacitación en materia de contaminación ambiental. Esta herramienta será desarrollada usando técnicas multimedia de computación, sistemas de información geográfica, sistemas expertos y modelos matemáticos, acoplados dentro de las redes actuales de comunicación masiva como Internet.

Para lograr este objetivo se desarrollarán siete casos de ejemplo, correspondientes cada uno a una

problemática ambiental regional claramente identificada (Argentina, China, Egipto, México, Tailandia, Venezuela y Zimbabwe). Cada caso (equivalente a un país) estará estructurado de tal manera que, además de plantear una problemática particular, permita aprender sobre el origen de tal problema, analizar los efectos relacionados con el mismo y plantear y evaluar posibles soluciones. Además, cada problema será planteado de manera tal que permita su empleo como guía en el estudio de otros casos similares.

Metodología

El desarrollo de este proyecto ha sido planteado con una duración de 30 meses de acuerdo con el siguiente calendario:

1. Elaboración de marco de referencia. Cada país participante recopilará y presentará la información estadística básica de su país y el planteamiento general del problema ambiental a tratar. Duración 12 meses.
2. Desarrollo y programación de los modelos matemáticos a emplear. Duración 12 meses.
3. Difusión y uso experimental de GAIA. Duración seis meses.

Durante el primer año del proyecto se realizaron dos reuniones generales de coordinación: selección de equipo de cómputo y diseño del protocolo de comunicación entre participantes; definición del caso a tratar por cada país, planteamiento general, alcance y áreas de aplicación.

Se definieron los indicadores, principalmente aquellos propuestos por Agenda 21, que debiesen formar parte indispensable en el planteamiento de cada uno de los problemas ambientales a tratar. Se establecieron las reglas generales de presentación de la información y el nivel académico para el análisis y tratamiento de los mismos. Posteriormente, cada participante se dio a la tarea de recopilar y procesar la información relativa a la situación global de su país y las condiciones particulares de la ciudad o zona en la cual se ubicaba el problema particular a analizar.

Los problemas ambientales abordados en GAIA, son:

- Argentina. Modelo de propagación urbana de epidemias. Se pretende establecer una relación entre el transporte público urbano en la Ciudad de Buenos Aires y la propagación de la tuberculosis.
- China. Administración de recursos turísticos. Se desarrollará un modelo para establecer las posibilidades de explotación de una zona turística, preservando la calidad ambiental de dicha zona.
- Egipto. Análisis y planeación de las áreas de desbordamiento del Río Nilo. Ante la afectación por la construcción de fronteras artificiales al desbordamiento del río, es indispensable planear y programar las nuevas obras en el área, para minimizar el impacto ambiental.
- México. Contaminación atmosférica urbana. La problemática ambiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) se analiza desde el punto de vista de la emisión del monóxido de carbono producido por los vehículos automotores que circulan en esta capital.
- Tailandia. Deforestación por asentamientos urbanos. La deforestación global del territorio nacional, producida por el crecimiento urbano no-planificado se pretende modelar para evaluar su impacto ambiental y considerarlo dentro de las futuras políticas de desarrollo.
- Venezuela. Deforestación por tala inmoderada. La selva de Venezuela es una de las riquezas de ese país y pulmones de este planeta, por lo que su preservación es primordial dentro de las políticas ambientales nacionales y cumplimiento de acuerdos internacionales.
- Zimbabwe. Este país tiene que establecer un modelo de crecimiento racional de dos fuentes nacionales de riqueza que actualmente compiten entre sí. Una es la creciente industria turística que fomenta la existencia y expansión de granjas de vida salvaje (principalmente elefantes) y la otra es las granjas agrícolas, también en creciente expansión.

Cada uno de estos temas constituye un complicado caso de gestión ambiental, siendo el caso planteado por México el que actualmente se encuentra más desarrollado, por existir amplia experiencia nacional e internacional sobre el tema de contaminación urbana.

Contaminación urbana

Para el desarrollo de este caso se parte de la información estadística de México y de la ZMCM y se establecen las características generales de la zona de estudio, haciendo énfasis en aquellas que contribuyen a la problemática ambiental: densidad de población, localización y estructura de la cuenca, condiciones meteorológicas, vialidades, consumo de combustibles, etcétera.

Cada una de las piezas de información arriba mencionada se denomina atributo, y es asociado a un punto que se localiza sobre una imagen de satélite de la zona de estudio, constituyéndose así el Sistema de Información Geográfica base del estudio (figura 1).

A partir de este SIG, se obtiene la información necesaria para correr un modelo de dispersión atmosférica. Las características del modelo y los datos que éste requiera dependerán del caso particular que se desee analizar: emisión de una fuente puntual fija, emisión global del parque vehicular, análisis por sectores o análisis global sobre toda la ZMCM. Como se mencionó antes, la selección del modelo será apoyada por un sistema experto que basará su recomendación entre otra información, en los datos contenidos dentro del Sistema de Información Geográfica.

Considerando la experiencia que se tiene en México en el uso y desarrollo de modelos atmosféricos, se estableció una etapa de doce meses para la adaptación o desarrollo de uno o más modelos atmosféricos, que pudiesen ser introducidos o referidos por esta página de Internet.

Además de los modelos propuestos por México para este caso de estudio, se planea probar otros modelos previamente desarrollados por Software y Servicios Ambientales (ESS) los cuales son fundamentalmente aplicaciones de modelos gaussianos a fuentes fijas de emisión; las figuras 2 a 4 corresponden a uno de estos modelos y muestran la entrada de datos meteorológicos y características de las emisiones, la pluma de dispersión calculada para condiciones continuas de emisión y viento, y las isolíneas de concentración promedio anual en una presentación tridimensional, respectivamente.

Además de la información que actualmente existe en GAIA, para el caso de contaminación urbana en México se introducirá, haciendo uso de multimedia, las bases teóricas que explican la formación de contaminantes en los procesos de combustión en vehículos automotores. Es importante recordar aquí que un programa multimedia debe incluir por lo menos tres de las siguientes técnicas computacionales: hipertexto, audio, video, animación e imágenes.

Finalmente, dentro de la realización del proyecto se ha programado la difusión masiva de la información recopilada durante la elaboración de la página de Internet descrita anteriormente, la cual, considerando que aún no es mundial el acceso a las redes internacionales de comunicación computarizada, se ha programado difundir empleado otros medios, esto es: escritura de la página en medios magnéticos como disco compacto y disquetes, y la elaboración de material audiovisual y ediciones de folletos y manuales explicativos sobre los casos que se presentan.

Resultados

Los resultados obtenidos a la fecha son muy alentadores, ya que la página es ampliamente consultada y los comentarios recibidos son positivos. Cada país que participa ha identificado a los posibles usuarios dentro del material elaborado y se diseñan actualmente los planes académicos para su empleo a diferentes niveles educativos.

Además, gracias a los resultados obtenidos, se ha planteado la elaboración de proyectos complementarios que involucren a diferentes sectores de los gobiernos e instituciones de los países participantes. En el caso de México se planea la participación del sector energético y el gobierno del Distrito Federal.

Agradecimientos

El presente proyecto se realiza con fondos de la Comunidad Europea, quien patrocinó la compra del equipo computacional necesario, y paga la asesoría de tres países europeos para la elaboración y difusión de la investigación de gestión ambiental de los otros países participantes.

Figura 1
Localización de atributos en una imagen de satélite

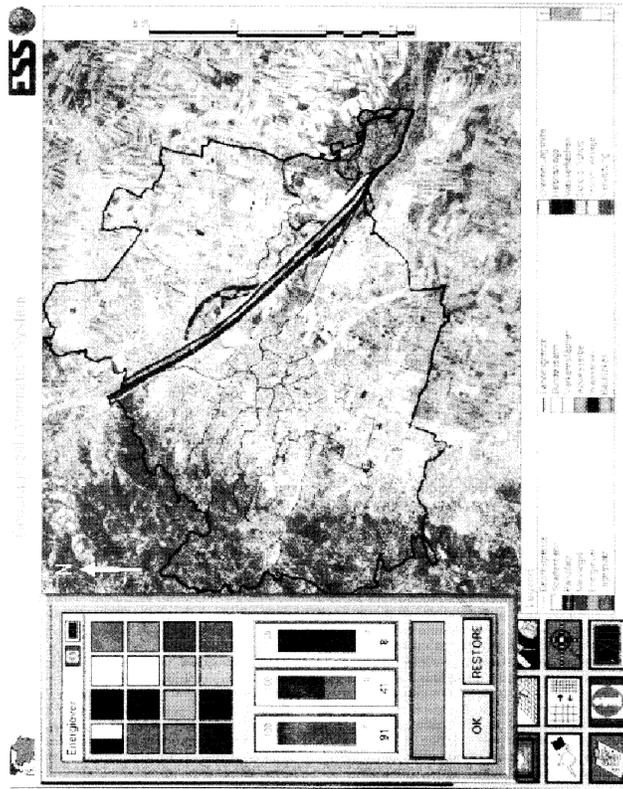


Figura 2
Entrada de datos meteorológicos (a)



Figura 3
Entrada de datos meteorológicos (b)

AirWare AIR QUALITY MANAGEMENT MODUL

Site: Tepic

Model Scenario: Scenario-1

Model: ISC Disp Form

Grid Size: 500 x 500 m

Emission Scenario

Name: DEFAULT_sources

Substance: SO2

Points: 1015 pts

Area: 0 g/s

Weather Scenario

Name: DEFAULT_weather

Period: 1877 To 1978

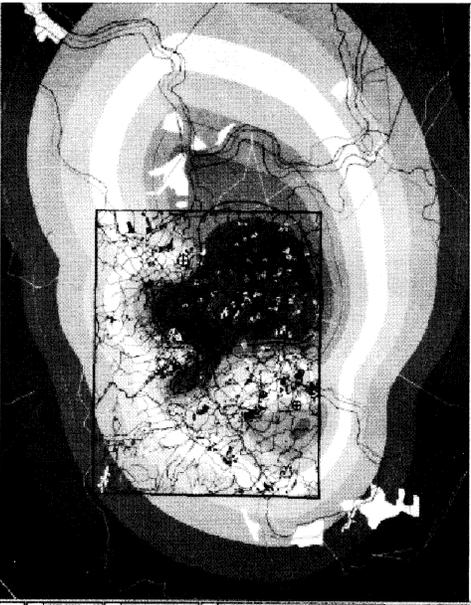
Emission Fr:

Wind Sp. Fr:

Annual Aeq: 278

Annual Peak: 308

Logfile



Site: Tepic

Model Scenario: Scenario-1

Model: ISC Disp Form

Grid Size: 500 x 500 m

Emission Scenario

Name: DEFAULT_sources

Substance: SO2

Points: 1015 pts

Area: 0 g/s

Weather Scenario

Name: DEFAULT_weather

Period: 1877 To 1978

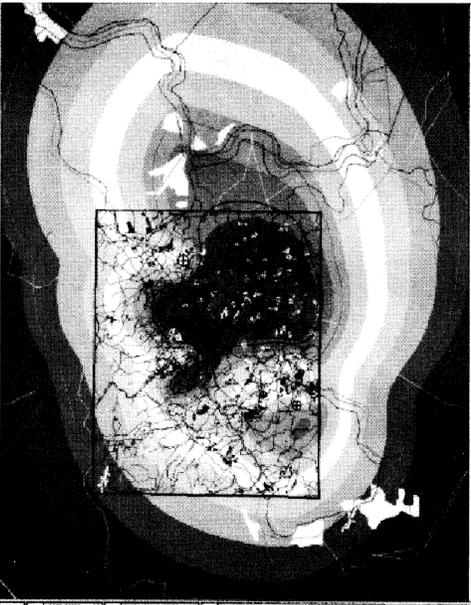
Emission Fr:

Wind Sp. Fr:

Annual Aeq: 278

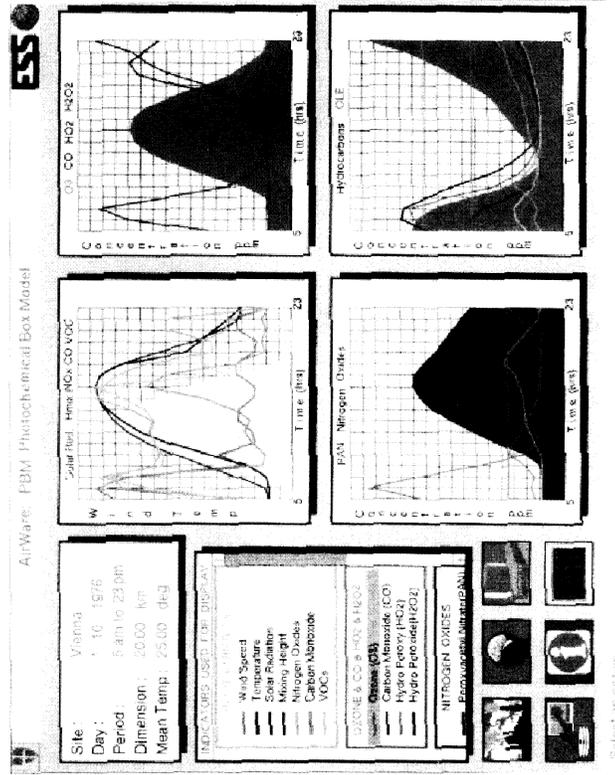
Annual Peak: 308

Logfile



See what an option =>

Figura 4
Características de emisiones



APLICACIÓN Y LIMITACIONES DE LOS MODELOS DE CALIDAD AMBIENTAL

Rina Aguirre
Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental,

Mesa redonda

Conclusión del Tercer Coloquio Binacional México-Japón: Modelos Matemáticos de Calidad del Aire.

Los participantes de esta mesa redonda fueron:

Dr. Javier Tejeda	CENICA
Dr. Francisco Guzmán	IMP
Dr. Adrián Fernández	INE
Dra. Rina Aguirre	CENICA
Ing. Sergio Sánchez	DDF

El tema central de la mesa fue definido como:

El uso de modelos matemáticos de calidad del aire como herramienta de apoyo para la gestión ambiental.

A continuación se resume la intervención de cada uno de los participantes en la mesa y la sesión de preguntas y respuestas.

Dr. Javier Tejeda. Presentó un resumen de los principales temas abordados durante los dos días del coloquio, resaltando algunos puntos como:

1. Es indispensable crear un mecanismo de intercambio y validación de información ambiental, que evite la duplicidad de trabajos en esta materia y permita avanzar con pasos firmes hacia la creación de herramientas de apoyo para la toma de decisiones.
2. Existe una variedad importante de modelos ambientales, matemáticos y experimentales, siendo de gran importancia analizar las aplicaciones para las cuales cada uno de los modelos presentados pueden ser usados.
3. Se expusieron, entre las aplicaciones, algunos casos de estudios académicos y en otros aplica-

ciones prácticas inmediatas en las cuales los modelos son herramientas directas de toma de decisiones.

Dr. Francisco Guzmán. El Dr. Guzmán es investigador en el Instituto de Mexicano del Petróleo (IMP), y fue coordinador del proyecto *Estudio Global de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM)*, siendo importante mencionar que éste ha sido el proyecto de mayor relevancia que se ha realizado en nuestro país en materia de contaminación atmosférica. El Dr. Guzmán resaltó que:

En el IMP existen dos grandes áreas de estudio relacionados con la aplicación de modelos de calidad del aire; la primera relacionada con la dispersión de contaminantes (modelos de dispersión), y la segunda con la afectación sobre sitios receptores (modelos de receptores). Dentro de cada una de estas áreas se reconoce que, habiendo un gran número de modelos matemáticos, pocos y en ocasiones ninguno es de aplicación directa para casos particulares.

De igual manera se aclara que para la toma de decisiones es indispensable establecer claramente las bases del problema que se analiza; si existe la posibilidad de modificar las fuentes emisoras es conveniente realizar un análisis previo para predecir los efectos que estas modificaciones producirán. Pero, si el planteamiento inicial exige la explicación del fenómeno antes de sugerir cambios puede ser de mayor utilidad un modelo de receptores que explique los efectos observados.

Los modelos de dispersión se emplean ampliamente en el IMP, desde los más sencillos de tipo gaussiano que se aplican principalmente para instalaciones de Petróleos Mexicanos en donde existen

emisiones puntuales elevadas. Los modelos de trayectoria se han empleado en el IMP para apoyar la toma de decisiones en casos en los cuales son de interés efectos a largo plazo, y principalmente las fuentes de área.

Los modelos tridimensionales requieren mayores requisitos computacionales y se han empleado principalmente para analizar estrategias más complejas en las que se aplican simultáneamente varias opciones de control. Son indispensables para analizar casos ambientales complejos como: topografía complicada, fuentes múltiples, receptores múltiples, etcétera.

También es importante mencionar el uso de modelos estadísticos que se emplean para el análisis y presentación de la información ambiental existente. Del uso adecuado de estos modelos (esto es, la manipulación correcta de mediciones de la calidad del aire), depende en gran medida la decisión adecuada de entre diferentes alternativas ambientales.

Además, de los modelos arriba mencionados se debe hacer mención de los modelos de cinética química, empleados para predecir las reacciones que se llevarán a cabo una vez que los contaminantes han sido emitidos, y sin los cuales es imposible estimar el tiempo de permanencia: creación y/o desaparición de especies peligrosas.

La relación entre los modelos y sus áreas de aplicación (patrocinadores de proyectos) se resaltó como estrategia para probar que el número de modelos existente está necesariamente relacionado con el número de aplicaciones diferentes que deben atacarse. Una de las aplicaciones de mayor relevancia dentro de los estudios del IMP se refleja sin duda en la página 42 del programa PROAIRE, en la cual se emplean los resultados de un modelo matemático del IMP como fundamento para establecer la política ambiental en materia de control de precursores de ozono en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Dr. Adrián Fernández. El Dr. Fernández es el Director General de Gestión e Información Ambiental del Instituto Nacional de Ecología y sin duda una de las autoridades que mayor número de herramientas de apoyo requiere para la toma de decisiones. El

Dr. Fernández estableció como punto primordial de su intervención la evaluación del efecto de los contaminantes en la salud.

Para comprender este efecto es importante conocer, además de la fuente de emisión y trayectorias de dispersión, los mecanismos de *exposición* que determinará en gran medida el efecto final sobre el receptor. Para estudios de exposición es conveniente revisar cuidadosamente el modelo idealizado para monóxido de carbono propuesto hace más de diez años, y en el cual se plantea simplemente que la afectación será mayor entre menor sea la distancia entre la fuente y el receptor. Este modelo, basado en análisis espacial es de tipo microescala y establece una expresión matemática entre distancia y afectación.

Para comprender los mecanismos de exposición deben además emplearse modelos de variación temporal de los contaminantes, estableciendo claramente las variables que modifican la permanencia puntual de especies contaminantes, esto es: velocidad de viento, radiación solar, humedad, presencia de sumideros, etcétera.

Estos modelos son de gran importancia pues nos permiten localizar aquellos puntos en los cuales la concentración de contaminantes se espera sea mayor a la reportada por las redes de monitoreo, debido a la distribución espacial de las fuentes de emisión, o bien en los cuales se esperan concentraciones menores y por lo tanto no se temen efectos adversos para la salud.

Empleando estos modelos de receptor es posible corregir (mediante análisis regresional la mayoría de las veces), las predicciones de calidad del aire basadas en modelos que se alimentan con datos de las redes de monitoreo.

Finalmente, se han desarrollado modelos relacionales en los cuales se establecen cruces entre variables como la velocidad de medios de transporte, la velocidad del viento y la afectación a la salud. Estos modelos poseen una estructura matemática generalmente muy simple, pero permiten evaluar adecuadamente los mecanismos de exposición, cuando se emplean correctamente (dentro de los límites de variabilidad para los que fueron desarrollados).

Ing Sergio Sánchez. El Ing. Sánchez trabaja para el Departamento del Distrito Federal (DDF) como Director de Proyectos Ambientales y tiene, entre sus responsabilidades, la obligación de seleccionar aquellas herramientas que el DDF debe adquirir o desarrollar para la realización de estudios ambientales y apoyo a la toma de decisiones.

El Ing. Sánchez recordó al inicio de su plática que el problema de la contaminación en la ZMCM no sólo es resultado de la concentración de fuentes de emisión, sino que en él se conjuntan factores topográficos y meteorológicos que lo convierten en un caso de gran complejidad.

Estableció que el eje de la política ambiental en la ZMCM es el inventario de fuentes de emisión, en el cual se cuantifican las fuentes existentes y los contaminantes, composición y concentración, que se arrojan a la atmósfera.

Sin embargo, reconoció que no siempre es posible medir todas las emisiones, por lo que se recurre al uso de modelos de emisión que estimen las emisiones no cuantificadas. El modelo MOBIL V se ha utilizado extensivamente en la ZMCM y se basa en la caracterización de los vehículos y combustibles empleados en esta zona.

El Ing. Sánchez hizo referencia a la intervención del Dr. Guzmán y su descripción de los modelos de dispersión usados por el IMP, así como a la información proporcionada por el Dr. Fernández relativa a los modelos de receptores. Mencionó algunos trabajos realizados en México en materia de modelación de las reacciones químicas atmosféricas e hizo hincapié en que no basta conocer datos de toxicología o epidemiología, sino que es necesario hacer pruebas de exposición y desarrollar modelos adecuados, y caracterizar los microambientes existentes en la zona metropolitana.

De la evaluación de exposición se desprende un análisis de riesgo. Riesgo ambiental definido como:

La probabilidad que ocurra algo multiplicado por la severidad del daño que este agente pudiera causar. Una vez establecidos los riesgos se requiere de una definición de estrategias que también requieren de una serie de elementos de

modelaje y análisis como: árboles de decisiones y otras herramientas que vinculen todas las variables del problema (físicas, químicas, sociales, políticas, etc.) que permitan establecer una decisión que resulte conveniente.

Otros elementos del sistema de toma de decisiones incluyen la participación social, para llegar a la instrumentación de acciones, y de aquí a una evaluación retrospectiva que establezca el impacto de nuestras acciones en la reducción de emisiones, la reducción de índices de contaminación y, finalmente, la reducción de efectos sobre la salud.

El Ing. Sánchez incluyó dentro de este presentación algunos comentarios sobre el modelo SIGMA, desarrollado por IBM para el DDF y mencionó que este modelo será continuado para incluir modelos matemáticos más complejos y bases de datos en tiempo real que mejoren la herramienta con la que actualmente se cuenta. También se ha iniciado un estudio dentro del DF para identificar los puntos de vialidad en los que existe efecto de cañón y en los cuales se empleará un modelo matemático para su análisis. El llamado efecto de cañón es el fenómeno aerodinámico que modifica el flujo natural de aire dentro de una larga calle limitada por edificios de gran altura.

Finalmente, el Ingeniero presentó resultados del análisis de concentración de monóxido de carbono en algunas de las principales vialidades del DF. Para obtener estos resultados explicó, se empleó un modelo de tránsito, un modelo de vientos y un modelo de dispersión local (modelo cañón); y se pretende implementar a partir de este análisis un modelo de exposición para establecer grupos de riesgo.

Dra. Rina Aguirre. Resumió las actividades académicas realizadas en la reunión de Modelos Ambientales previa a este coloquio, pidiendo a las autoridades ambientales que no pierdan de vista la existencia de grupos nacionales de desarrollo de modelos de calidad del aire y al auditorio en general que recuerden que cada problema de contaminación atmosférica que se presente deberá ser analizado dentro de la óptica correspondiente, siendo difícil que se cuente *a priori* con la herramienta necesaria para su modelación.

Sesión de preguntas

- ¿Existe la posibilidad de que la declaración de días de contingencia se realice con base en los resultados de un modelo matemático de calidad del aire?

Hasta este momento no se cuenta con tal herramienta, pero sí se reconoce la necesidad de integrar un modelo meteorológico que sirva como criterio para tomar tales decisiones.

Los factores que determinan la concentración de contaminantes en un día determinado son:

La emisión del día, la acumulación de días anteriores y las condiciones meteorológicas del día en cuestión. Sin embargo la variabilidad de los dos primeros son prácticamente imperceptibles comparados a las enormes variaciones que se registran en los parámetros meteorológicos.

- ¿Porqué no se emplean modelos matemáticos para definir cómo se puede mejorar la vialidad para reducir la contaminación por vehículos automotores?

Definitivamente la vialidad en el DF tiene que ser mejorada y no es necesario emplear un modelo matemático para establecer que esto mejoraría la calidad del aire, sin embargo sí es cierto que el empleo de modelos podrá ayudar a decidir cuáles son las medidas más adecuadas para lograr la mejora que se busca en las vialidades.

Debe hacerse notar que mejorar la vialidad no sólo depende de mejores vías de acceso, sino es determinante proporcionar educación vial ya que éste es un problema claramente identificado en nuestra ciudad (necesidad de colocar topes en nuestras calles, costumbre de estacionamiento en doble carril, etc.).

- ¿Cómo se puede asegurar un microambiente limpio dentro de medios de transporte?

Para evaluar estos microambientes es necesario establecer de dónde vienen los contaminantes en el interior de los vehículos. Generalmente estos contaminantes vienen del exterior (si no existe una falla mecánica en el vehículo de estudio), por lo tanto sí es posible plantear una mejora en estos microambientes.

La publicación de esta memoria
fue realizada con el apoyo de la
Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA)

El contenido de los artículos publicados en esta memoria
es responsabilidad de sus autores

Cuidado de la edición:

Dr. Javier Tejeda Ruiz
Bíol. Rogelio Serrano Garza
Ing. Jorge Gómez Perales
Ing. Graciela Ramos Rodríguez

C. Felipe Ángeles García

El tiraje de la publicación
fue de 500 ejemplares. La formación,
negativado, impresión y encuadernación
estuvo a cargo de Foto Diseño García.
Julio de 1997.