

EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN BOGOTÁ

M. Gaitán & E. Behrentz

Grupo de Estudios en Sostenibilidad Urbana (SUR) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de Los Andes, Bogotá, Colombia.

-Bogotá Enero de 2009-

RESUMEN: La ciudad de Bogotá cuenta con una moderna red de monitoreo de la calidad del aire (RMCAB) operada por la autoridad ambiental local. Esta red, a través de sus 15 estaciones, se encuentra en capacidad de generar registros confiables y en tiempo real de diversas variables meteorológicas así como de concentraciones atmosféricas de contaminantes criterio. Durante la presente investigación se realizó un cuidadoso análisis de los registros contenidos en la RMCAB haciendo uso de herramientas estadísticas formales y programas especializados en el análisis de la información geográfica. Los resultados de los análisis realizados sugieren que el principal problema de contaminación del aire de la ciudad de Bogotá se debe a las elevadas concentraciones atmosféricas de la fracción respirable de material particulado (PM_{10}). Estos valores tienden a encontrarse muy por encima de los niveles sugeridos por las normas de calidad del aire. A través de análisis geoestadísticos se identificó además que esta problemática se concentra en la zona centro occidental de la ciudad. Así mismo se observó que este fenómeno presenta variaciones temporales que se encuentran relacionadas con variables meteorológicas como la dirección y velocidad del viento.

ABSTRACT: During this research project we conducted temporal and spatial analysis of the information registered by Bogotá's air quality monitoring network. We built a database that was designed to facilitate the processes of validating and analyzing the air quality data, which were used to quantify the city's air pollution problem. Our results suggest that air pollutants such as carbon monoxide and sulfur and nitrogen oxides do not represent a major air pollution problem. At the same time, however, the particulate matter ambient air concentrations in Bogotá tend to be much higher than the levels suggested by the local air quality standards.

1 INTRODUCCIÓN

El notable deterioro de la calidad del aire en Bogotá (y su directa relación con problemas de salud respiratoria y cardíaca) ha generado una creciente preocupación por parte de las autoridades ambientales y de salud pública de la ciudad. A pesar de los esfuerzos realizados en años recientes, el problema de contaminación atmosférica es cada vez más severo. Esta situación se explica, en parte, por el acelerado crecimiento económico que se ha presentado en Bogotá. Dicho crecimiento se ve manifestado en una mayor demanda de energía así como en un acelerado consumo de combustibles fósiles. Las medidas de control de la contaminación que han sido implementadas hasta el momento se han visto opacadas por el incremento en las emisiones que resultan del crecimiento económico de la ciudad.

El diagnóstico del problema actual de contaminación del aire en Bogotá ha sido posible gracias a que desde el año de 1997 la ciudad cuenta con una moderna red de monitoreo de la calidad del aire (RMCAB) que se encarga de hacer seguimiento, en tiempo real, de las concentraciones de los distintos contaminantes así como de diversas variables meteorológicas. La información proporcionada por esta red de monitoreo es utilizada para establecer las tendencias de contaminación en la ciudad y para entender las variables que determinan dichas tendencias.

La información de calidad del aire generada por la RMCAB es también una herramienta de diseño de política pública, ya que sirve de soporte técnico y científico para las medidas y políticas que el gobierno local establece con el fin de mejorar las condiciones ambientales de la ciudad. Al mismo tiempo, en los registros de una red de monitoreo se encuentra la mejor información para hacer segui-

miento a dichas medidas de tal forma que se puede establecer si las mismas han tenido el efecto esperado.

La utilización de redes compuestas por estaciones fijas de monitoreo de la calidad del aire es una práctica común en múltiples países del mundo. La zona metropolitana del valle de México cuenta actualmente con 47 estaciones de monitoreo operadas por el sistema de monitoreo atmosférico de Ciudad de México. Dicho sistema se compone de la red automática de monitoreo atmosférico, la red meteorológica, la red manual de monitoreo atmosférico y la red de depósito atmosférico. La ciudad de Beijing (China) cuenta con 28 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire, localizadas en un área de más de 100 km². Estas estaciones, al igual que otros 150 puntos de muestreo pasivo, conforman la red de monitoreo ambiental de Beijing.

En 1993 se estableció la red de monitoreo ambiental de Londres, por medio de la cual se integraron una serie de antiguas estaciones de monitoreo. Esta red cuenta con sistemas de monitoreo de contaminantes criterio y variables meteorológicas en 30 de las áreas suburbanas más importantes de la ciudad. La información recopilada por la red se complementa diariamente con datos suministrados por estaciones independientes operadas por entidades de municipalidades aledañas. La red de Londres se encuentra equipada con un moderno sistema de información denominado AIRtext, por medio del cual se informa a la comunidad (vía correo electrónico y mensajes de texto) acerca de episodios severos de contaminación.

Otro ejemplo de redes de monitoreo de la calidad del aire es el sistema del Estado de California en Estados Unidos, en donde se cuenta con más de 250 estaciones automáticas ubicadas estratégicamente. Esta red de monitoreo se encuentra organizada en 35 localidades distribuidas en 15 cuencas atmosféricas con características geográficas similares. Las estaciones son operadas por la agencia de calidad del aire de California, el distrito local de control de la contaminación del aire, el distrito administrativo de la calidad del aire y el servicio de parques nacionales. Este sistema de redes genera información en tiempo real para las concentraciones atmosféricas de los contaminantes criterio así como para una gran variedad de sustancias tóxicas.

El objetivo del trabajo aquí descrito fue el de generar herramientas que permitan realizar un análisis formal del estado de la calidad del aire en la ciudad con énfasis en la variación temporal y espacial de la contaminación por material particulado. Durante los análisis aquí efectuados se consideraron variables meteorológicas tales como intensidad de precipitación y dirección y velocidad del viento.

2 METODOLOGÍA

2.1 Adquisición y validación de la información

Durante la primera etapa del trabajo, se recopiló la información proveída por la RMCAB para la totalidad de los registros (desde septiembre de 1997 hasta febrero de 2008) de las 15 estaciones que conforman la red. Trece de estas estaciones son de monitoreo mixto (datos de calidad del aire y variables meteorológicas) mientras que las dos restantes sólo cuentan con equipos meteorológicos. Para los parámetros de calidad del aire, la red utiliza sistemas de medición con sensores tipo DASIBI y OPSIS.

Los equipos de medición de la red permiten el monitoreo continuo (con una resolución temporal de 10 minutos) de las concentraciones atmosféricas de óxidos de nitrógeno (NO, NO₂, NO_x), dióxido de azufre (SO₂), material particulado en sus fracciones total (TSP), respirable (PM₁₀) y fina (PM_{2.5}), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), metano, benceno, tolueno, formaldehído e hidrocarburos no metánicos. Las variables meteorológicas que se monitorean incluyen precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad y dirección de viento, presión barométrica y humedad relativa.

Para la medición de las concentraciones atmosféricas de contaminantes la RMCAB utiliza analizadores beta (PST, PM₁₀ y PM_{2.5}), equipos de fluorescencia UV (SO₂ y O₃), equipos de quimioluminiscencia (NO_x) y sistema de correlación infrarroja (CO). No todas las estaciones que hacen parte de la red generan registros para todos los parámetros mencionados anteriormente.

A pesar de que las estaciones que conforman la red se encuentran distribuidas por toda la ciudad, se presenta una mayor densidad de éstas hacia la zona centro-occidental (ver Figura 1), en donde se concentra gran parte de la actividad vehicular e in-

dustrial. Las zonas cubiertas por las estaciones fijas de monitoreo corresponden a un amplio rango de condiciones de calidad del aire de tal forma que se encuentran estaciones en zonas residenciales con bajo tráfico vehicular, en zonas comerciales de alto tráfico vehicular, en zonas mixtas de carácter comercial y residencial, y en zonas de alta actividad industrial.

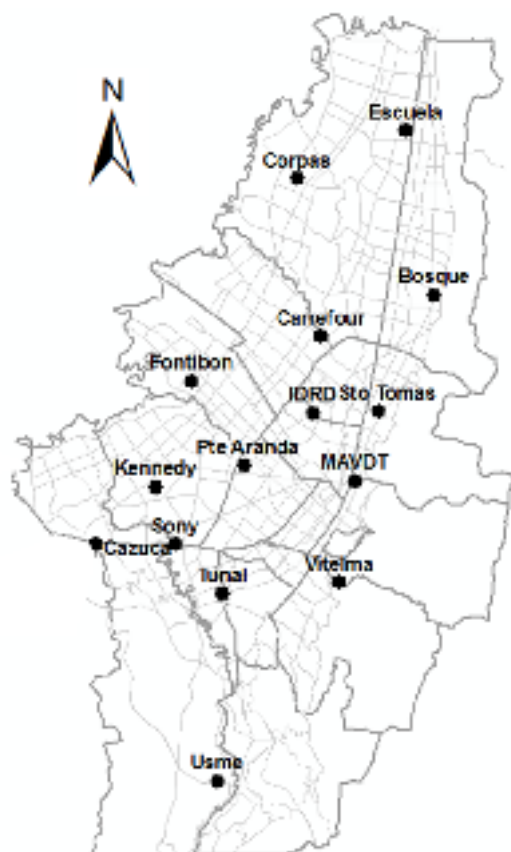


Figura 1. Ubicación de las estaciones de la red de calidad del aire de Bogotá (los puntos negros representan la ubicación de las estaciones).

Para cada variable (meteorológica y de calidad del aire) que hace parte de la base de datos se cuenta con más de 360,000 registros. Al mismo tiempo, cada tabla de la base de datos (una tabla para cada una de las 15 estaciones que conforman la red) cuenta en promedio con 30 variables. De esta forma, la base de datos construida en este trabajo se encuentra compuesta por más de 160 millones de entradas.

Cada una de las tablas que hace parte de la base de datos en referencia cuenta con una librería de

variables en la que se definen todos los campos (variables) de las tablas y se especifican las unidades de los valores reportados. Para todos los casos se cuenta con un campo de validación en donde se indica la confiabilidad de los valores. Este campo también especifica si no se contaba con información para una entrada en particular o si dicha entrada fue eliminada por considerarse fuera de tendencia durante el proceso de validación.

2.2 Diagnóstico de la calidad del aire de Bogotá

Con el fin de agrupar y evaluar la información de calidad del aire en la ciudad se calcularon promedios horarios, diarios, mensuales y anuales y se generaron series de tiempo para observar el comportamiento y tendencias de los diferentes contaminantes. Este procedimiento se llevó a cabo considerando únicamente aquellos períodos de tiempo en los que se contaba con más del 75% de los registros, garantizando de esta forma la representatividad de la información.

Todos los resultados obtenidos fueron comparados con los estándares de calidad del aire que hacen parte de la legislación ambiental colombiana. Entre el conjunto de contaminantes para los cuales se cuenta con información en la ciudad, en este trabajo se llevaron a cabo análisis para SO_2 , NO_2 , CO , O_3 y PM_{10} .

Para determinar de forma cuantitativa el grado de contaminación atmosférica para toda Bogotá se definió el índice porcentual de excedencias de la norma (IPE). Esta métrica fue utilizada para resumir el problema de contaminación en toda la ciudad en reemplazo del uso de un promedio de los valores reportados por todas las estaciones. Esta última metodología, si bien es comúnmente utilizada, es altamente inconveniente y los resultados generados con la misma no tienen un verdadero valor científico.

El IPE para cada contaminante se calculó a partir de promedios horarios y/o diarios al compararlos con la norma de exposición prolongada (v.g., norma anual para material particulado), de acuerdo a la Ecuación (1). En donde NE es el número de veces en las que el promedio diario (u horario) excede la norma en referencia y ND es el número total de datos disponibles para cada una de las estaciones (i) de la red. Adicional a cada reporte del índice porcentual de excedencia se informa, a

través de un porcentaje, la cantidad de registros a partir del cual éste fue calculado.

$$\text{IPE} = \sum_i \left(\frac{N_E}{N_D} \right) \bullet 100 \quad (1)$$

2.3 Análisis técnico de la contaminación por material particulado PM_{10}

Para el caso de la fracción respirable de material particulado (PM_{10}), y por razones que serán discutidas más adelante, se hizo énfasis en el estudio de la variación espacio-temporal de este contaminante. Como parte de los factores a considerar se evaluaron algunas variables meteorológicas como la precipitación, la velocidad y la dirección del viento, buscando establecer posibles relaciones entre dichos parámetros y los fenómenos de contaminación en la ciudad.

En esta etapa del proyecto se realizó un detallado análisis geostadístico de la información, en el cual se revisaron las principales técnicas de interpolación que permiten modelar la distribución espacial de los contaminantes. Como resultado se obtuvo una metodología estandarizada y técnicamente soportada que utiliza el modelo Kriging Simple como herramienta de interpolación para la generación de mapas de iso-concentración. En estos mapas es posible observar las variaciones de los niveles de contaminación por material particulado en Bogotá. Haciendo uso de dicha metodología, se elaboraron más de 300 mapas que fueron agrupados en un video en el cual se recopila toda la información sobre la distribución espacial de la contaminación por material particulado en la ciudad, desde el año 1997 hasta el año 2008.

Adicionalmente este análisis permitió la elaboración de un índice de contaminación asociado a cada una de las localidades. Este índice consiste en un promedio ponderado de los valores de cada una de las curvas de isoconcentración contenidas en la localidad, como se muestra en la Ecuación (2), donde a_n corresponde al área de la curva, A_T es el área total de la localidad y C_n se refiere al valor de contaminación asociado a cada curva.

$$\text{ID}_L = \sum_n \left(\frac{a_n}{A_T} \bullet C_n \right) \quad (2)$$

3 RESULTADOS

Tal como es el caso de otros centros urbanos, las condiciones meteorológicas y climatológicas de Bogotá influyen de manera muy importante en su calidad del aire. Dada su cercanía al Ecuador ($4^{\circ}35' N$; $74^{\circ}04' W$) y su altura sobre el nivel del mar (2,640 msnm) en Bogotá se observan elevados niveles de intensidad lumínica que en numerosas ocasiones superan los 1,000 $W h m^{-2}$. La ciudad se encuentra limitada en el occidente por un río que lleva su mismo nombre y en el oriente por una cadena montañosa que juega un papel determinante en los patrones predominantes de viento. El área total de la zona urbana del distrito capital de Bogotá (dividido en 19 localidades) es de 1,730 km^2 en donde habitan cerca de 7.9 millones de personas para una densidad poblacional de 4,550 habitantes por kilómetro cuadrado (DANE, 2005).

Bogotá cuenta con un régimen de lluvias bimodal con épocas lluviosas en los meses de marzo, abril, octubre y noviembre. La precipitación anual en la ciudad es de alrededor de 900 mm con una frecuencia que depende de la cercanía a los cerros orientales de la ciudad. Típicamente se presentan vientos en sentido oriente-occidente en horas de la mañana mientras que en la tarde los vientos predominantes viajan hacia el norte de la ciudad. La velocidad media del viento es de $1 m s^{-1}$, siendo comúnmente el mes de agosto la época de vientos más fuertes en la ciudad. La temperatura media de la ciudad es de $14^{\circ}C$ y la humedad relativa media es de 80%. Es común que en horas de la noche la temperatura descienda hasta los $4^{\circ}C$ mientras que en el día se pueden registrar temperaturas de hasta $25^{\circ}C$ (DAMA, 2006).

El inventario oficial de emisiones indica que tanto industrias como vehículos aportan de manera significativa al problema de contaminación del aire que se observa en la ciudad. La flota vehicular supera las 1.2 millones de unidades (Ministerio de Transporte, 2006) y se encuentra compuesta por vehículos cuya edad promedio es mayor a 10 años (Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá, 2006). Estos valores son superiores a los observados en otras ciudades de América Latina tales como Sao Paulo, Santiago de Chile y Ciudad de México (Lents et al., 2004). Los vehículos de transporte público de la ciudad se alimentan principalmente de combustibles diésel. En el caso de Bogotá y hasta el 1 de julio de 2008 este combustible contaba con elevados niveles de azufre que

que superaban las 1,000 partes por millón (ppm); a partir de esta fecha, en la ciudad se distribuye combustible diésel de menor azufre (500 ppm).

Bogotá es el centro industrial más importante de Colombia. En esta ciudad se presentan todo tipo de actividades económicas incluyendo construcción, manufactura de bienes y prestación de servicios. Dichas actividades hacen que la ciudad aporte más del 25% del producto interno bruto nacional (Departamento Nacional de Estadística, 2005). El consumo de combustible diésel (en sus formas vehicular e industrial) en la ciudad durante el año 2006 fue superior a los 300,000 galones diarios (UPME, 2006).

3.1 Diagnostico del problema de contaminación del aire en Bogotá

De acuerdo con los registros de la RMCAB y según los resultados referentes a las violaciones de la norma de calidad del aire expresados en términos de la métrica IPE, en Bogotá no se presenta un problema de contaminación del aire para SO_2 (ver Figura 2), NO_2 (Figura 3), CO (Figura 4) y O_3 (ver Figura 5). Para el caso de SO_2 , las concentraciones atmosféricas rara vez superan la norma anual (30 ppb). Lo mismo ocurre para las normas diaria y de 3 horas. Algo similar se observa para las concentraciones de NO_2 , las cuales típicamente son inferiores a la norma anual de la ciudad (53 ppb). Para el caso del ozono troposférico y el CO se observan igualmente concentraciones relativamente bajas en la ciudad, las cuales suelen ser inferiores a 5 ppm.

Los análisis realizados muestran cómo para dichos contaminantes los casos de violaciones durante los últimos 4 años no superan en ningún momento el 3%.

Si bien es necesario un análisis más riguroso para llegar a la conclusión de que los contaminantes antes mencionados no representan un problema para Bogotá, la importancia relativa de éstos si puede cuantificarse mediante los métodos aquí utilizados. Esto es especialmente cierto al observar los resultados obtenidos para el material particulado.

3.2 Material Particulado

De manera contraria a lo observado para CO , NO_2 , SO_2 , y O_3 , las concentraciones atmosféricas de material particulado superan los valores establecidos por la reglamentación ambiental de la ciudad. En particular, en la zona industrial de Bogotá (localidad de Puente Aranda), dichas violaciones a la norma se presentan de manera permanente desde hace varios años.

Los datos reportados por la RMCAB representan una evidencia importante de que el principal contaminante del aire en la ciudad de Bogotá es el material particulado. La Figura 6 muestra el índice porcentual de excedencia de la norma anual de PM_{10} en Bogotá. Estos resultados permiten observar cómo desde el año 2001 y a nivel de toda el área urbana del distrito capital se incumple la norma anual de PM_{10} (70 $\mu\text{g m}^{-3}$) en más del 40% de

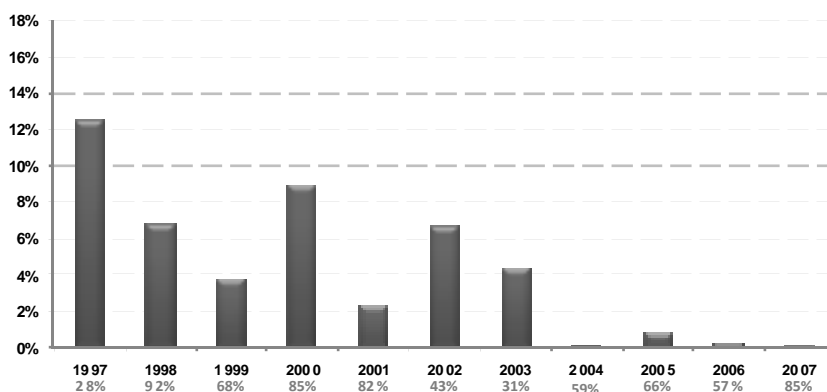


Figura 2. Índice de porcentaje de excedencia de la norma anual de SO_2 en Bogotá. Este índice fue calculado a partir de los promedios diarios de SO_2 reportados por todas las estaciones de la ciudad (En la parte inferior se reporta en porcentaje la cantidad de datos disponibles a partir del cual este fue calculado).

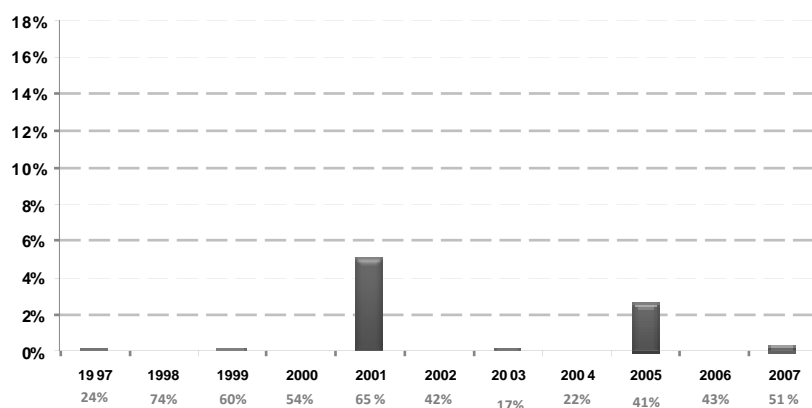


Figura 3. Índice de porcentaje de excedencia de la norma anual de NO_2 en Bogotá. Este índice fue calculado a partir de los promedios diarios de NO_2 reportados por todas las estaciones de la ciudad (En la parte inferior se reporta en porcentaje la cantidad de datos disponibles a partir del cual este fue calculado).

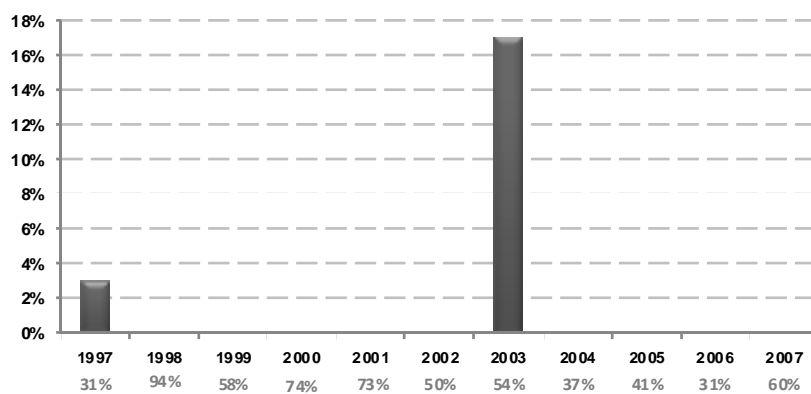


Figura 4. Índice de porcentaje de excedencia de la norma octo-horaria de CO en Bogotá. Este índice fue calculado a partir de los promedios octo-horarios de CO reportados por todas las estaciones de la ciudad (En la parte inferior se reporta en porcentaje la cantidad de datos disponibles a partir del cual este fue calculado).

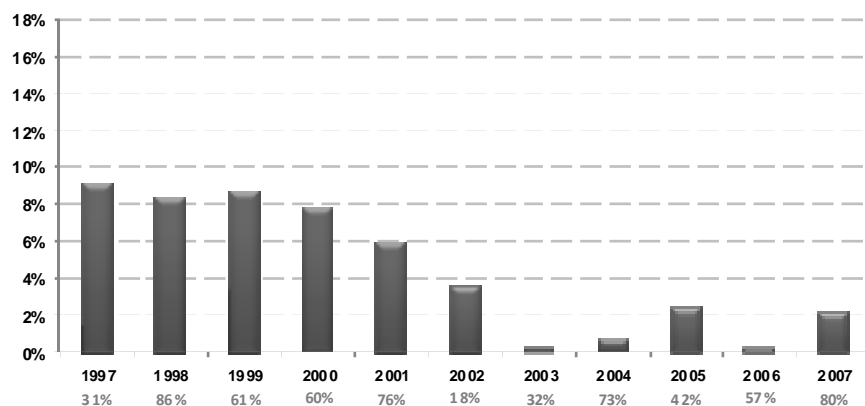


Figura 5. Índice de porcentaje de excedencia de la norma octo-horaria de O_3 en Bogotá. Este índice fue calculado a partir de los promedios octo-horarios de O_3 reportados por todas las estaciones de la ciudad (En la parte inferior se reporta en porcentaje la cantidad de datos disponibles a partir del cual este fue calculado).

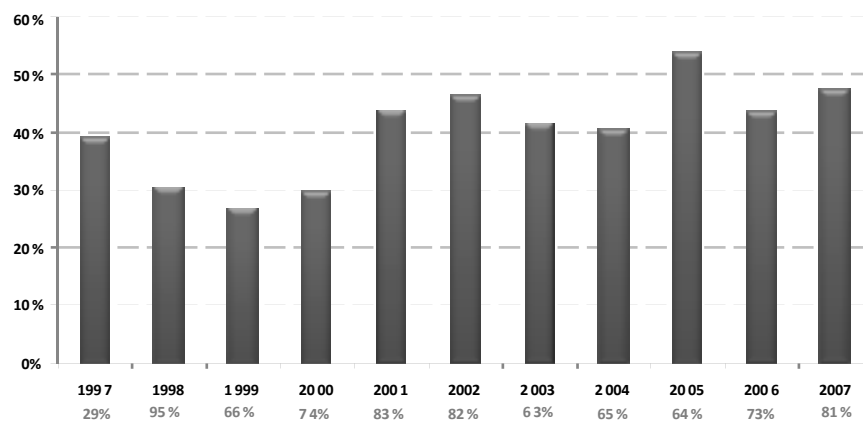


Figura 6. Índice de porcentaje de excedencia de la norma anual de PM_{10} en Bogotá. Este índice fue calculado a partir de los promedios diarios de PM_{10} reportados por todas las estaciones de la ciudad (En la parte inferior se reporta en porcentaje la cantidad de datos disponibles a partir del cual este fue calculado).

los días del año. Esto significa que durante una proporción significativa de tiempo, los habitantes de la ciudad se encuentran expuestos a niveles de contaminación por material particulado que son considerados como inadecuados por entidades como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud.

En la Figura 7 se puede apreciar que esta situación es particularmente crítica en la zona industrial de la ciudad (ubicada en el centro-occidente), en la que es común que más del 80% de los días del año se presenten valores superiores al equivalente a la norma anual de PM₁₀. Durante el año 2005, dichas excedencias se presentaron cerca del 100% de los días del año en las estaciones de Kennedy y Puente Aranda.

En la Figura 8 se muestra el IPE para toda la ciudad y para todos los contaminantes criterio considerados en este estudio. Estos resultados representan evidencia adicional de que el PM₁₀ es el contaminante crítico en Bogotá. Esto a su vez demuestra que las políticas de control ambiental y de mejoramiento de calidad del aire en la ciudad deben estar enfocadas hacia dicho contaminante.

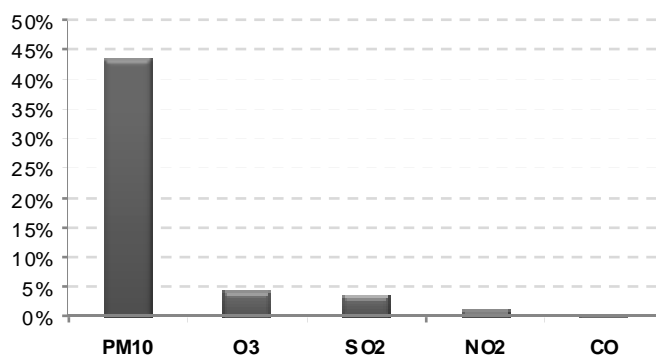


Figura 8. Índice de porcentaje de excedencia de la norma de calidad del aire para CO, PM₁₀, O₃, SO₂, y NO₂ durante el año los últimos 10 años. Estos índices hacen referencia a la frecuencia de violaciones de la norma de exposición prolongada para los promedios reportados por todas las estaciones de la ciudad.

La Figura 9 muestra una media móvil (paso = 365) de las concentraciones medias diarias de PM₁₀ registradas en la estación localizada en la zona industrial de Bogotá. Estos resultados muestran claramente la forma como la contaminación por material particulado en esta zona se vio incrementada entre el año 2001 y el año 2005. Esta tendencia es similar a la que se observa para el crecimiento del producto interno bruto de la ciudad. En esta

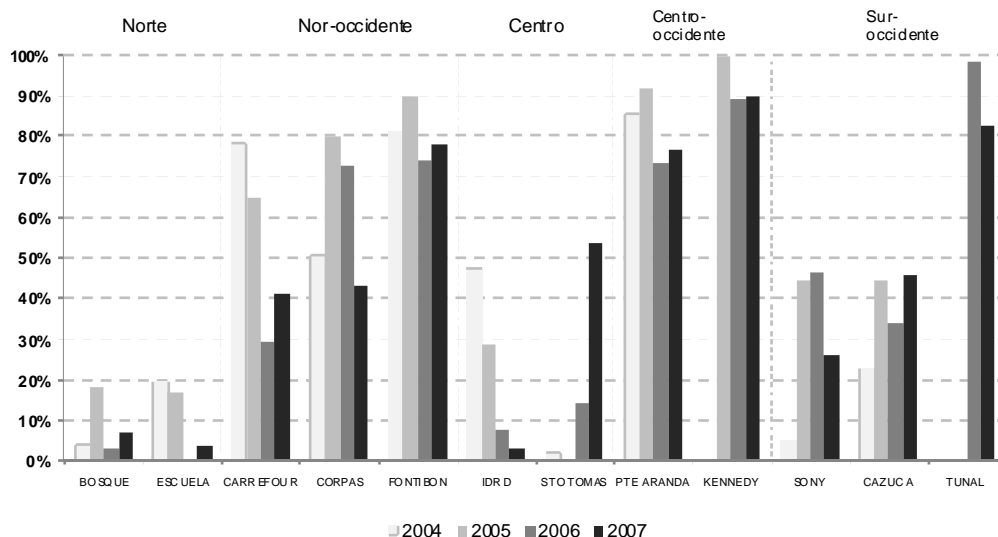


Figura 7. Índice de porcentaje de excedencia de la norma anual de PM₁₀ en Bogotá por estación. Este índice fue calculado a partir de los promedios diarios de PM₁₀ reportados por cada estación de la ciudad.

misma figura se observa una disminución notable en los niveles de contaminación entre el año 2000 y el año 2001. Este comportamiento se explica, en parte, por el mejoramiento de la calidad del combustible diésel que se distribuye en la ciudad. En el año 2000 se estableció una normatividad especificando que dicho combustible no debería tener un contenido de azufre superior a 1,200 ppm (anteriormente el contenido de azufre en el combustible diésel comercializado en Bogotá era de 4,500 ppm).

Los resultados mostrados en la Figura 9 también sugieren que durante el año 2006, la contaminación por PM₁₀ se redujo en la zona industrial de la ciudad. Sin embargo, una buena parte de dicha disminución puede verse explicada por variables meteorológicas (en particular la velocidad del viento), según será discutido a continuación.

La Figura 10 muestra las concentraciones de PM₁₀ y los valores de velocidad del viento registrados durante ocho años en la estación de la RMCAB ubicada en la zona industrial de Bogotá. De estos resultados es evidente la influencia que la velocidad del viento ejerce en los niveles de contaminación por material particulado que se perciben en esta zona de la ciudad: A mayor velocidad del viento la concentración por material particulado es menor. Para estas dos variables se obtuvo un coeficiente de correlación (inversa) de Pearson (r) de 0.65. Al realizar un análisis similar considerando otras variables, tales como la intensidad de precipitación, no se logró mejorar dicho coeficiente de forma significativa. Estos resultados sugieren que la velocidad del viento es la variable meteorológica que más influye en los niveles de contaminación por material particulado en Bogotá.

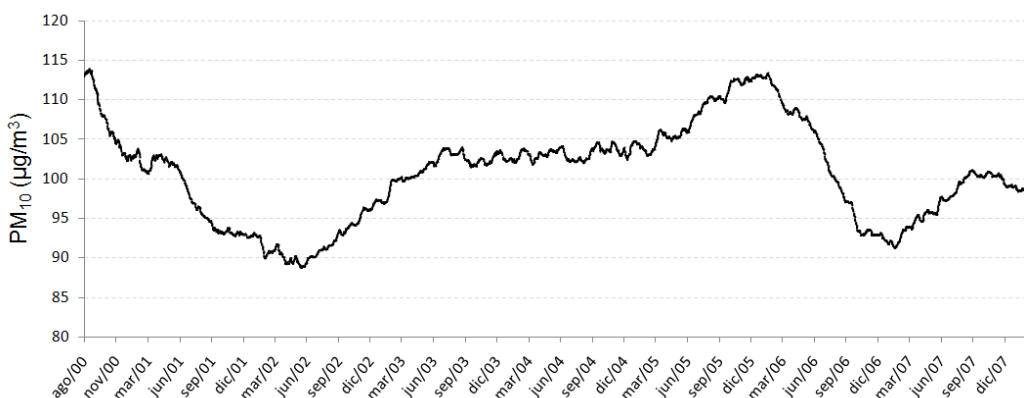


Figura 9. Concentraciones atmosféricas de material particulado en la zona industrial de Bogotá (Media móvil de 365 días)

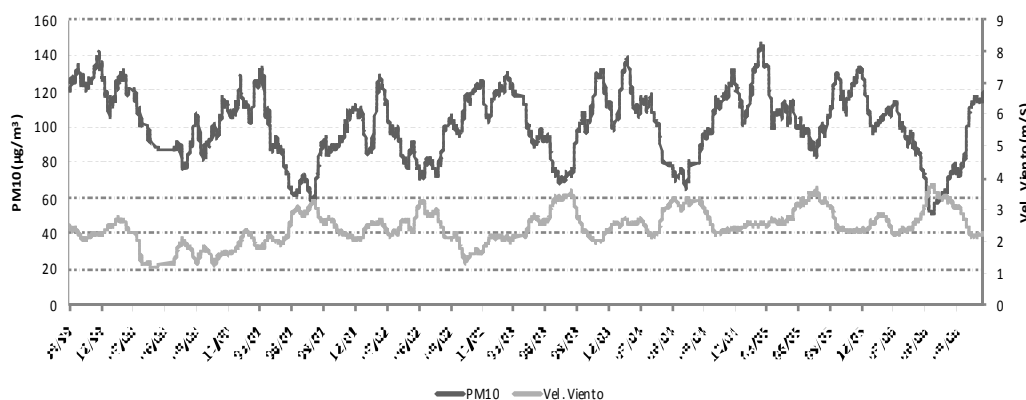


Figura 10. Concentraciones atmosféricas de material particulado en la zona industrial de Bogotá y su relación con la velocidad del viento.

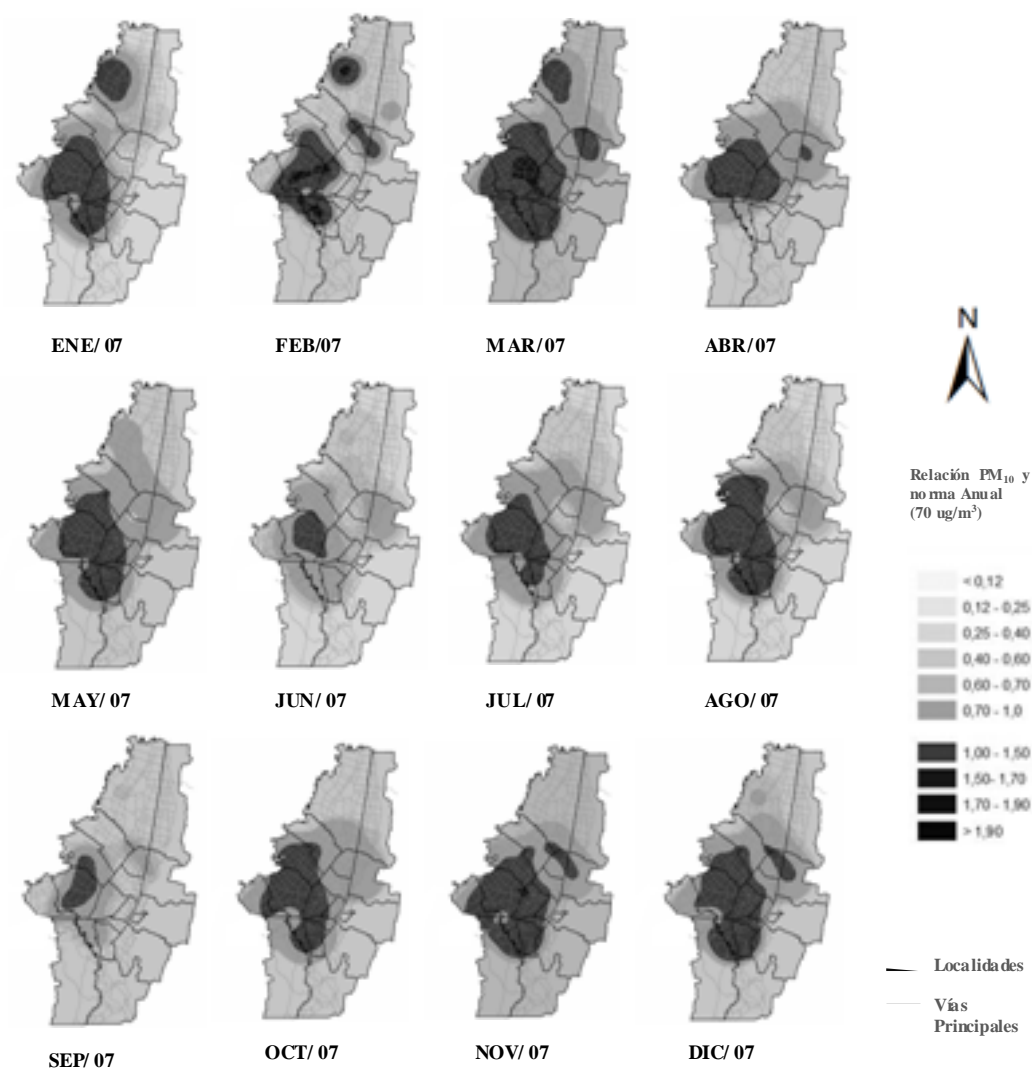


Figura 11. Mapas mensuales de iso-concentraciones de PM₁₀ en Bogotá para el año 2007. La escala de grises representa el nivel de cumplimiento e incumplimiento de la norma anual (1.0 significa que el promedio anual fue equivalente al valor de la norma anual).

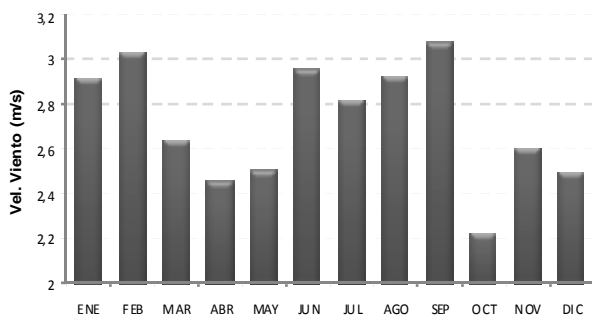


Figura 12. Velocidad promedio del viento en el centro-occidente de Bogotá durante el año 2007.

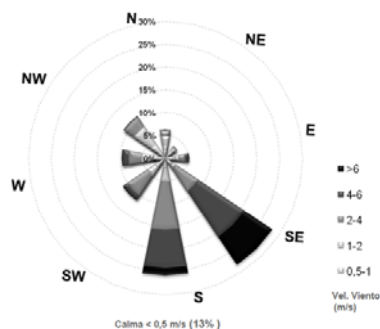


Figura 13. Rosa de viento de los datos del mes de septiembre de 2007 para la zona centro-occidente de Bogotá.

En este mismo sentido se puede resaltar que los valores de velocidad del viento observados durante los primeros meses del año 2006 son superiores a aquellos observados en años anteriores (ver Figura 12). Esta situación podría explicar gran parte de la reducción en los niveles de contaminación por material particulado que se observan para este mismo año (Figura 10).

En la Figura 11 se muestra a través de una secuencia mensual de mapas de iso-concentración, la evolución de la contaminación por PM_{10} en la ciudad de Bogotá durante el año 2007. En estos mapas la escala de colores hace referencia a la relación entre la concentración del contaminante y los niveles máximos permitidos. Con los colores más intensos se identifican las zonas de incumplimiento que llegan a alcanzar niveles incluso superiores al doble de la norma (>1.9).

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 11, los niveles de contaminación atmosférica por material particulado en la ciudad presentan estacionalidad. Para el año en mención, los meses en los que se registraron menores concentraciones de dicho contaminante corresponden a aquellos en los que se reportaron los valores más altos de velocidad del viento (ver Figura 12), siendo septiembre el mes donde se observaron los valores máximos, con fuertes vientos predominantemente provenientes del suroriente (ver Figura 13). A partir de la información suministrada por los mapas de isoconcentración se deduce que para este mes, en Bogotá se pudo haber presentado un fenómeno de transporte de PM_{10} hacia zonas externas del perímetro urbano.

En la Figura 14 se presenta de manera gráfica un resumen de los niveles promedio de contaminación para el año 2007. Este mapa, desarrollado a partir de las curvas de isoconcentración, corresponde a la asignación del índice de contaminación por localidades. Los índices más elevados se registran en las localidades de Puente Aranda, Kennedy, Rafael Uribe, Antonio Nariño y Tunjuelito, ubicadas en la zona suroccidental de la ciudad. Esta zona se caracteriza por tener un importante número de fuentes fijas de emisión de contaminantes atmosféricos y un alto flujo de vehículos de carga.

Al comparar los resultados obtenidos en este análisis para cada localidad con estudios recientes sobre morbilidad y mortalidad en la ciudad, se observa que la localidad no corresponde al nivel de

resolución espacial adecuado y que es necesario enfocar los análisis en áreas de estudio más limitadas (v.g Unidades de Planeación Zonal y/o Barrios).

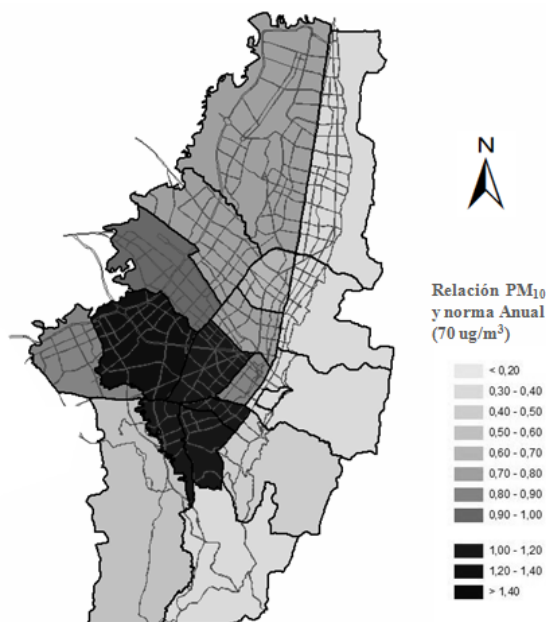


Figura 14. Mapa de contaminación por material particulado por localidad en Bogotá para el año 2007.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los datos de calidad del aire en conjunto con la información meteorológica permitió establecer que la velocidad del viento es el parámetro más influyente (por encima de la intensidad de precipitación) en los niveles de contaminación por material particulado. A mayor velocidad del viento la concentración por material particulado es menor. Para estas dos variables se obtuvo un coeficiente de correlación (inversa) de Pearson (r) de 0.65.

Según los resultados de este trabajo, en Bogotá no se presenta un problema de contaminación del aire para SO_2 , NO_2 , CO y O_3 . Para todos estos contaminantes las concentraciones registradas por la red de monitoreo de la ciudad suelen ser inferiores

a los límites establecidos por la regulación ambiental local.

De manera contraria a lo observado para los contaminantes mencionados anteriormente, las concentraciones atmosféricas de material particulado superan los valores establecidos por la reglamentación ambiental de la ciudad. En particular, en la zona industrial de Bogotá las violaciones a la norma de calidad del aire se presentan de manera permanente desde hace varios años. Entre los años 1998 y 2007, siete estaciones de la red han reportado medias anuales que superan la norma anual para PM_{10} .

Desde el año 2001 y a nivel de toda el área urbana del distrito capital se incumple la norma anual de PM_{10} en más del 40% de los días del año. Esto significa que durante una proporción significativa de tiempo, los habitantes de la ciudad se encuentran expuestos a niveles de contaminación por material particulado que son considerados como inadecuados por entidades como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y la Organización Mundial de la Salud.

Esta situación es particularmente crítica para la zona industrial de la ciudad en la que es común que más del 90% de los días del año se presenten valores superiores al equivalente a la norma anual de PM_{10} .

Los análisis detallados de la información generada por la RMCAB deben ser considerados como un instrumento para el diseño de políticas públicas, que sirvan de soporte técnico y científico para las medidas y políticas que el gobierno local establece, con el fin de mejorar las condiciones ambientales de la ciudad.

5 AGRADECIMIENTOS

Secretaría Distrital de Ambiente.

Grupo de interés en sistemas de información geográfica de la Universidad de los Andes (UASIG).

6 REFERENCIAS

1. ARRIETA, S. M. 2006. Análisis de Costos Asociados al Mejoramiento de la Calidad del Combustible en Colombia. Uniandes. Bogotá, Colombia.
2. BEHRENTZ, E. 2006. Contaminación Atmosférica en Bogotá: Relación entre Salud Pública y Calidad del Combustible Vehicular y Propuesta de Acciones Pertinentes. Revista ANDESCO – Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos Domiciliarios y Actividades Complementarias. Volumen 12: 11 – 17.
3. RESTREPO C., ZIMMERMAN, R., THURSTON, G., CLEMENTE, J., GORCZYNSKI, J., ZHONG, M., BLAUSTEIN, M., CHI CHEN, L. 2004. A comparison of ground-level air quality data with New York State Department of Environmental Conservation monitoring stations data in South Bronx, New York. Atmospheric Environment 38; 5295-5304.
4. CAVALLAZI, M., 1996. Contaminación atmosférica en Bogotá: situación actual y recomendaciones para su monitorio. Revista Cámara de Comercio de Bogotá 97. Páginas 85 - 93.
5. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). 2003. Evaluación de la Calidad del Aire en Santiago de Chile. Área Descontaminación Atmosférica CONAMA Región Metropolitana de Santiago. Chile
6. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). 2006. Censo 2005. Información Disponible en: www.dane.gov.co
7. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). 2003. La Prevención y el Control de la Contaminación Atmosférica en Bogotá. Bogotá
8. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). Base de Datos Red de Medición de la Calidad del Aire de Bogotá RMCAB.
9. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente (DAMA). Informe Anual de Calidad del aire de Bogotá Año 2005. Bogotá, Marzo de 2006.
10. Environmental Protection Agency (EPA). Air Quality Index. Información disponible en: www.epa.gov/ebtpages/airairquality.html

11. Environmental Protection Agency (EPA). 2004. The Particle Pollution Report Current Understanding of Air Quality and Emissions through 2003. U.S. Environmental Protection Agency office of Air Quality Planning and Standards Emissions, Monitoring, and Analysis Division Research Triangle Park, North Carolina.
12. KOCK, H.H., BIEBER, E., EBINGHAUS, R., SPAIN, T.G., THESS, B. 2005. Comparison of long-term trends and seasonal variations of atmospheric mercury concentrations at the two European coastal monitoring stations Mace Head, Ireland, and Zingst, Germany. *Atmospheric Environment* 39: 7549 – 7556.
13. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales – IDEAM. Red de Estaciones Hidrometeorológicas de Colombia – Bogotá. Datos de Precipitación y Vientos.
14. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales – IDEAM. 2005. Análisis e Interpretación de Datos de la Calidad del Aire Bogotá
15. Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales – IDEAM. 2005. Documento Soporte Norma de Calidad del Aire. Subdirección de estudios ambientales. Bogotá
16. Lents, J., 2004. Estudio de la Actividad Vehicular en Sao Paulo. International Sustainable System Research. California.
17. Ministerio de Transporte. 2006. Reporte de la Distribución Vehicular en Bogotá. Disponible en:
www.mintransporte.gov/Servicios/Estadisticas/Transporte_Automotor
18. GOYALA, P., CHANB, A.T., JAISWALA, N. Statistical models for the prediction of inhalable suspended particulate matter in urban cities. *Atmospheric Environment*. Article in Press.
19. Secretaría de Tránsito y Transporte de Bogotá (SST). Información disponible en:
www.transitoBogotá.gov.co
20. Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). Boletín Mensual de Precios. Ministerio de Minas y Energía. Julio 2006.