

Evaluación de los niveles de partículas PM₁₀ y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de San José, Costa Rica: 2005-2006

Fecha de recepción: 03/09/2008

Fecha de aceptación: 28/03/2009

Jorge Herrera-Murillo¹

Susana Rodríguez Román²

Palabras clave

Material particulado PM₁₀, Dióxido de nitrógeno, contaminación del aire, San José, Costa Rica.

Key words

Particulate Matter PM₁₀, Nitrogen Dioxide, Air Pollution, San José, Costa Rica.

Resumen

Se determinó los niveles de material particulado PM₁₀ en dos sitios de la Ciudad de San José (Catedral Metropolitana y Junta de Educación) durante un año (setiembre 2005-setiembre 2006), obteniendo como promedio anual $36 \pm 8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. En forma adicional, se midió los niveles de sulfatos, nitratos y cloruros para ambos sitios y las medias anuales resultaron no ser significativamente diferentes para ambos sitios, con un nivel de significancia del 5%.

En tres de los catorce sitios de medición de la concentración de dióxido de nitrógeno en la ciudad, se presentaron valores superiores a la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, para un mes de monitoreo. El análisis de componentes principales aplicados a los datos de este gas, muestra que las variaciones en los niveles se deben a fenómenos de larga escala (meteorológicos).

Abstract

Measurements of particulate matter PM₁₀ concentrations were made in two points of San José City (Metropolitan Cathedral and Education Office) during a year (September 2005-September 2006), obtaining an annual mean of $36 \pm 8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $25 \pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively. In the two points, the difference between the mean of sulphate, nitrate and chloride in particulate matter was not significant, showing 5% of significance.

1. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado 86-3000 Heredia, Costa Rica. Tel. (506) 2277-3292. Correo electrónico: jherrer@una.ac.cr.
2. Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel. (506) 2511-5376. Correo electrónico: rr.susana@gmail.com / susanar@cariari.ucr.ac.cr

In three of fourteen points, the nitrogen dioxide levels have been largest than World Health Organization reference values for a monthly sampling. The variations in NO₂ levels was caused by a large scale phenomenon, according to the principal component analysis.

Introducción

San José, la capital de Costa Rica, se localiza en la Depresión Tectónica Central del país. Las coordenadas geográficas medias del cantón de San José están dadas por 09° 56' 16" latitud norte y 84° 06' 55" longitud oeste, y su anchura máxima es de dieciséis kilómetros en dirección noroeste a sureste. Forma parte de la unidad geomórfica de origen volcánico representada por el relleno volcánico de la Depresión Tectónica Central, que corresponde a una superficie plana ondulada. La unidad está formada en superficie por rocas volcánicas, principalmente lavas, tobas e ignimbritas cubiertas por ceniza en un espesor variable. Geomorfológicamente, esta unidad no es un valle, pero para efectos políticos, socioeconómicos y para todo tipo de referencia, se considera preferible seguirlo denominando Valle Central. El nombre técnico correcto es fosa tectónica, debido a la presencia de una falla a todo lo largo del pie de la Sierra Volcánica Central, la cual está evidenciada por la existencia de fuentes termominerales, así como por la interrupción brusca y alineada con la supuesta falla de las estribaciones que bajan de la mencionada Sierra hacia el Valle, lo mismo que por la presencia de un vulcanismo sin explicación aparente (Formación Pacacua), en correspondencia con la posición de la falla o cerca de ella (IFAM, 2003).

El crecimiento urbano histórico de San José se ha dado de forma radial, o sea, se está generando nuevas áreas en adición a las que ya gravitan sobre las infraestructuras urbanas existentes, cuyas características son inadecuadas para atender las nuevas

necesidades y cuya readaptación resulta extremadamente costosa. Este proceso, acompañado de una gran descoordinación entre diferentes actores urbanos, hace cada día más deficiente la operación de la ciudad, provocando un incremento desmedido del tráfico vehicular, lo cual ha traído como consecuencia un deterioro considerable en la calidad del aire que se respira.

Sin embargo, la percepción de los sentidos no es una fuente confiable para medir los niveles de contaminación en el aire y por ello se suele recurrir a métodos científicos capaces de medir con exactitud la concentración de determinados contaminantes en el aire. Las mediciones así realizadas se conocen como "monitoreo de la calidad del aire" y son necesarias para poder determinar los posibles daños que sufriría la salud de la población expuesta, decidir las mejores medidas de control y evaluar si las medidas adoptadas están surtiendo efecto.

De esta manera, ese "aire contaminado" del que se queja la gente, se transforma en cifras que permiten determinar cuáles sustancias y en qué medida están sobrepasando los límites recomendados e identificar así las fuentes que los producen para controlarlas. De allí que el monitoreo de la calidad del aire se convierte en una importante herramienta para las autoridades en su labor de protección de la calidad del medio ambiente.

Los indicadores de la calidad del aire son aquellos contaminantes atmosféricos que se emiten en mayores cantidades y que son a la vez los más dañinos para la salud humana. Las concentraciones de dichas sustancias en la atmósfera han sido aceptadas por la comunidad científica internacional como una medida de la calidad del aire y se han convertido por consiguiente en objeto de estudio de muchas instituciones técnico-científicas, para determinar aspectos como sus fuentes de emisión, sus tiempos de vida y reacciones que generan en la atmósfera,

De esta manera, ese "aire contaminado" del que se queja la gente, se transforma en cifras que permiten determinar cuáles sustancias y en qué medida están sobrepasando los límites recomendados e identificar así las fuentes que los producen para controlarlas.

además de sus efectos sobre la salud, las plantas, los animales y los bienes materiales. Todo esto con el fin de encontrar cuáles pueden ser los valores guía y los límites más adecuados que no frenen el desarrollo económico, pero que a la vez garanticen una calidad segura del aire.

La Universidad Nacional, en cooperación con la Municipalidad de San José y el Ministerio de Salud de Costa Rica, lleva a cabo el monitoreo de material particulado PM_{10} y dióxido de nitrógeno en la Ciudad de San José desde el año 2003.

Material particulado

El material particulado atmosférico se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (con excepción del agua pura) presentes en suspensión en la atmósfera (Mészáros, 1999). Generalmente, el término aerosol atmosférico se utiliza como sinónimo de partículas atmosféricas, aunque esta definición no es estricta. Es necesario considerar que el término material particulado atmosférico es un concepto amplio que engloba tanto las partículas en suspensión como las partículas sedimentables (diámetro $> 20 \mu m$), caracterizadas por un corto tiempo de residencia en la atmósfera (varias horas).

Las partículas atmosféricas pueden ser emitidas por una gran variedad de fuentes de origen natural o antropogénico. Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias) o bien ser generadas por reacciones químicas (partículas secundarias). Dichas reacciones químicas pueden consistir en la interacción entre gases precursores en la atmósfera para formar una nueva partícula por condensación, o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol por adsorción o coagulación (Warneck, 1988).

Como resultado de esta variabilidad de fuentes y transformaciones, el material particulado atmosférico consiste en una

mezcla compleja de compuestos de naturaleza orgánica e inorgánica, con diferentes distribuciones granulométricas y composiciones químicas, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean.

La contaminación atmosférica por material particulado se define como la alteración de la composición natural de la atmósfera como consecuencia de la entrada en suspensión de partículas, ya sea por causas naturales o por la acción del hombre (Mészáros, 1999). La presencia de las partículas en la atmósfera, así como su posterior deposición, puede generar efectos tanto en el clima y los ecosistemas como en los seres vivos (Schwartz, 1994 y 1996).

En términos de calidad del aire, se define también cuatro parámetros fundamentales atendiendo al tamaño de corte de los sistemas de captación: PST, PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 . Mientras que el término PST se refiere a Partículas en Suspensión Totales, PM_{10} se define como la masa de partículas que atraviesa un cabezal de tamaño selectivo para un diámetro aerodinámico de $10 \mu m$ con una eficiencia de corte del 50%. La misma definición para cabezales de corte de $2.5 \mu m$ y $1 \mu m$ se aplica para $PM_{2.5}$ y PM_1 , respectivamente.

Los efectos que puede inducir el material particulado en el organismo dependen de la granulometría, la morfología y la composición química de las partículas, el tiempo de exposición y la susceptibilidad de cada persona. Todas las partículas de diámetro $< 10 \mu m$ (PM_{10} , partículas torácicas) tienen un tamaño suficiente para penetrar en la región traqueobronquial, pero sólo aquellas de diámetro $< 2.5 \mu m$ ($PM_{2.5}$, partículas alveolares) pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar mayores afecciones.

A partir de numerosos estudios epidemiológicos llevados a cabo en las décadas de 1980 y 1990, se ha obtenido

En estudios realizados con humanos, se ha demostrado que la exposición a concentraciones ambientales altas de dióxido de nitrógeno aumenta la respuesta de personas asmáticas a agentes alérgicos inhalados.

suficientes datos para afirmar que existe una correlación significativa entre la exposición al material particulado atmosférico y diversos efectos adversos sobre la salud (Dockery et al., 1993; Schwartz, 1994 y 1996; Bascom et al., 1996; Dockery y Pope, 1996). En estos estudios los niveles de material particulado han sido caracterizados de diferentes formas, incluyendo la concentración en masa total (Partículas en Suspensión Totales, PST), la concentración de algunas de sus fracciones (PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1), la composición química o la concentración de black carbon (BC). Según sus resultados, a modo de ejemplo, en Austria, Suiza y Francia el 6% de las muertes anuales (aproximadamente 40.000 muertes/año) son atribuibles a la contaminación por partículas atmosféricas (Künzli et al., 2000). Los efectos de la exposición al material particulado atmosférico se observan tanto en episodios de contaminación crónicos como agudos (WHO, 2002). Ambos tipos de episodio conllevan aumentos en los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, siendo éstas las principales causas de los incrementos en la mortalidad (Schwartz, 1994; Dockery y Pope, 1996).

Dióxido de nitrógeno

El dióxido de nitrógeno es considerado un marcador esencial de la contaminación del aire asociada a emisiones vehiculares, de forma tal que poder caracterizar la distribución temporal y espacial de los niveles de este contaminante en centros urbanos, resulta de vital importancia con el fin de predecir sus posibles impactos en la salud humana.

En estudios realizados con humanos, se ha demostrado que la exposición a concentraciones ambientales altas de dióxido de nitrógeno aumenta la respuesta de personas asmáticas a agentes alérgicos inhalados, la cual es medida como un descenso en la función pulmonar (Strand et al., 1997, 1998). Los niveles bajos de

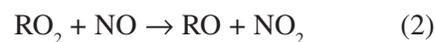
dióxido de nitrógeno en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea. La exposición a bajos niveles también puede producir acumulación de líquido en los pulmones, uno o dos días después de la exposición. Respirar altos niveles de dióxido de nitrógeno puede rápidamente producir dilatación de los tejidos en la garganta y las vías respiratorias superiores, reduciendo la oxigenación de los tejidos del cuerpo, produciendo acumulación de líquido en los pulmones y la muerte.

El óxido nítrico (NO) es un contaminante primario muy importante emitido tanto por fuentes móviles como estacionarias. En ocasiones, las emisiones de NO son acompañadas por pequeñas cantidades de dióxido de nitrógeno. Sin embargo, el NO es convertido en el aire ambiente a NO_2 , de forma tal que este último puede ser considerado tanto un contaminante primario como secundario.



La oxidación del NO por parte del oxígeno es muy lenta ($k_1 = 2,0 \times 10^{-38} \text{ cm}^6 \text{ molécula}^{-2} \text{ s}^{-1}$), lo cual permite encontrar concentraciones importantes de NO cerca de las chimeneas en la pluma formada por los gases de escape (Finlayson-Pitts et al., 1986).

La conversión de NO a NO_2 en aire ambiente se puede dar también por una cadena de oxidación que involucra especies orgánicas, cuyo precursor es el radical hidroxilo. Por ejemplo, el radical hidroxilo puede atacar una molécula de propano, dando origen al radical propilo y agua. El radical propilo, a su vez, reacciona con una molécula de oxígeno para formar un radical alquilperóxido, el cual oxida el NO a NO_2 :



Otra vía importante de generación de NO₂ la constituye la reacción entre el NO y el ozono:



Debido a la ocurrencia de la reacción descrita anteriormente, no es posible encontrar concentraciones significativas de ozono y óxido nítrico en una misma masa de aire (Finlayson-Pitts et al., 1986).

Metodología

Material Particulado PM₁₀

Para realizar el muestreo del material particulado PM₁₀, se seleccionó dos sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de San José, los cuales se caracterizan por ser categoría B de acuerdo con la clasificación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. La categoría B se asigna a aquellos sitios donde se presenta alta concentración de contaminantes con bajo potencial de acumulación y que están ubicados de 3 a 15 metros de una arteria de alto flujo vehicular con buena ventilación natural.

Localización del primer sitio de muestreo

En las instalaciones de la Catedral Metropolitana de San José, a 10 m de la carretera y a 3 m sobre el nivel del suelo.

Localización del segundo sitio de muestreo

En la Junta de Educación de San José, a 12 m de la avenida 12 y a 3 m sobre el nivel del suelo.

La campaña de muestreo se realizó durante el año comprendido entre setiembre del 2005 y setiembre del 2006, para lo cual se recolectó muestras tres veces por semana los días lunes, miércoles y viernes.

Para la toma de las muestras se utilizó dos muestreadores de aire de alto volumen marca Thermo Andersen modelo MFC.

Una vez cada seis muestreos, se realizó la calibración del flujo del muestreador de aire, al comparar las lecturas de caída de presión generadas por el flujo al pasar por un orificio crítico calibrado VARIFLO modelo 454, con las indicaciones del equipo. Las mediciones de caída de presión se realizaron con dos manómetros de agua conectados al orificio y al equipo respectivamente.

Para cada uno de los muestreos, se tomó registros de las condiciones promedio de temperatura y presión atmosférica con la ayuda de un anemómetro marca KESTREL modelo 5000.

Para la recolección de las partículas, se utilizó filtros de fibra de vidrio marca Whatman (CAT N.º 1829932, Grado G653).

Dichos filtros fueron acondicionados al menos 24 horas en una desecadora bajo las siguientes condiciones: temperatura de 15°C a 30°C y una humedad menor al 40%, antes de ser pesados en balanza analítica, al inicio y después de la conclusión de los muestreos. El transporte de los filtros al campo se realizó en bolsas rotuladas con cierre hermético.

A partir de los filtros recolectados y con el fin de determinar los niveles de aniones presentes en el material particulado (cloruro, sulfato, nitrato) de cada uno de ellos, se cortó una tira de 2,5 cm de ancho utilizando un cuchillo y una regla plástica. Dicha tira se colocó en un balón esmerilado 24/40 de 250 mL, al cual se le adicionó 50 mL de agua Milli-Q con el fin de extraer los aniones presentes. Posteriormente, se calentó el contenido del balón en un sistema de reflujo por 30 minutos, se dejó enfriar y se trasvasó cuantitativamente a un balón aforado de 100,00 mL. Luego se agregó 30 mL de agua Milli-Q al balón, se calentó por otros 30 minutos y una vez frío, se trasvasó los residuos al balón aforado. Se realizó tres enjuagues con agua Milli-Q y una vez frío el contenido del balón, se aforó con agua desionizada.

Por último, se tomó una porción de la disolución del balón aforado y se filtró utilizando un papel Whatman 541. La disolución resultante se utilizó para el análisis de los aniones por cromatografía de intercambio iónico.

Para el análisis se utilizó un cromatógrafo de iones marca DIONEX, modelo DX-100, con una columna Ion Pac AS4A-SC de 4 mm, un supresor de ionización ASRS-ULTRA de 4 mm y un graficador modelo 4400.

Se cuantificó por interpolación en una curva de calibración de 0,5 a 7 mg/L de los aniones (sulfato, nitrato, cloruro) bajo las siguientes condiciones experimentales:

Eluente: disolución 1,8 mM Na_2CO_3 / 1,7 mM NaHCO_3

Flujo del eluente: 2 ml / min

Sensibilidad: 10 μS

Los límites de detección y cuantificación para la técnica instrumental se presentan en los cuadros 1 y 2, respectivamente. Es importante tener en cuenta que la magnitud del límite de detección depende de dos factores primordialmente. El primero de ellos es la sensibilidad de calibración (pendiente de la curva de calibración), ya que entre más sensible sea una especie, menor será el límite de detección. Por esta

razón, el sulfato, que es la especie que tiene la pendiente mayor, tiene los límites de detección más bajos. El otro factor es la dispersión de los datos de cada especie, ya que entre mayor sea la desviación estándar a bajas concentraciones, mayor será el límite de detección.

Dióxido de nitrógeno

Para la determinación de los niveles de dióxido de nitrógeno, se utilizó el método de muestreo pasivo. El procedimiento pasivo de captación de muestras tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación, por los cuales las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas hasta repartirse de manera uniforme en su seno, así como de atravesar una membrana sólida que le presente una determinada capacidad de permeación. Debido a estos fenómenos, un dispositivo situado en un ambiente contaminado durante cierto tiempo, será capaz de incorporar sobre el material captador dispuesto en su interior una determinada cantidad del contaminante que será proporcional, entre otros factores, a la concentración ambiental del mismo (Herrera et al, 2005).

Para el monitoreo de dióxido de nitrógeno en la Ciudad de San José, se ubicó 14 puntos como se observa en el mapa de la figura 1. La descripción detallada de cada uno de los sitios de muestreo se presenta en el cuadro 3.

Para cada uno de los sitios se calculó el promedio de 6 ó 4 réplicas de los tubos pasivos, expuestos durante 22 días en contenedores situados en postes del tendido eléctrico, a una altura de 3 m en cada uno de los sitios de monitoreo, durante los meses de setiembre del 2005 a setiembre del 2006.

En el muestreo del NO_2 se utilizó tubos pasivos marca Passam, los cuales constan de una malla impregnada con una disolución de trietanolamina y acetona, la

Cuadro 1. Límites de detección en aire obtenidos para el análisis de la concentración de los aniones por cromatografía de intercambio iónico.

Sulfato	Nitrato	Cloruro
0,06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 2. Límites de cuantificación en aire obtenidos para el análisis de la concentración de los aniones por cromatografía de intercambio iónico.

Sulfato	Nitrato	Cloruro
0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Cuadro 4. Promedios anuales de la concentración de material particulado PM₁₀ para los dos puntos de monitoreo de la Ciudad de San José, año 2005-2006.

Sitio de monitoreo	Valor máximo (µg/m ³)	Valor mínimo (µg/m ³)	Promedio (µg/m ³)	Mediana (µg/m ³)	Desviación Estándar (µg/m ³)	Varianza (µg/m ³) ²
Catedral Metropolitana de San José	57	23	35,7	35,0	7,8	60,6
Junta de Educación de San José	50	10	25,4	25,0	6,8	47,0

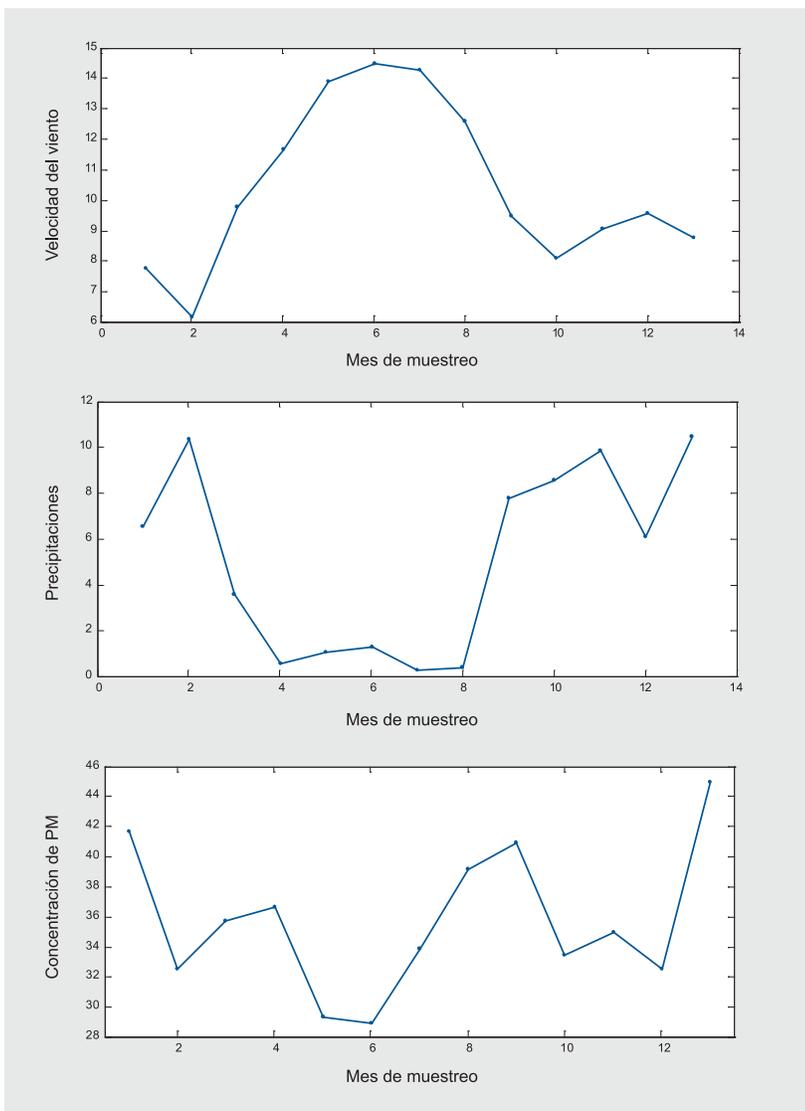


Figura 2. Variación mensual de la concentración de PM₁₀ y variables meteorológicas para la Catedral Metropolitana, 2005-2006.

cual, después de ser expuesta, se coloca en un vial al cual se agrega 5 ml del reactivo de Griess, para la generación de un complejo coloreado cuyo máximo de absorción se encuentra a 542 nm. La absorción de radiación a esa longitud de onda por parte del complejo, es proporcional a la concentración del dióxido de nitrógeno adsorbido en la malla.

Resultados y discusión

Material Particulado PM₁₀

Los dos sitios de muestreo seleccionados para el monitoreo de material particulado PM₁₀, representan dos zonas diferentes de la Ciudad de San José, ya que la Catedral Metropolitana se encuentra apostada en el centro de la Ciudad, que es una zona de alto flujo vehicular caracterizada por ser netamente comercial, mientras que la Junta de Educación se localiza en una zona de transición entre el sector comercial y el residencial de la capital de Costa Rica. Lo anterior se ve evidenciado en el hecho de que para el período de medición, las medias anuales para ambos sitios resultaron ser significativamente diferentes entre sí, al aplicar la prueba de Kruskal-Wallis a un 5% de significancia, debido a la influencia de las emisiones de fuentes móviles y a las bajas velocidades de circulación de los vehículos en la zona comercial de la capital.

Al analizar los resultados obtenidos durante el período de monitoreo, se pudo observar que para ambos sitios de muestreo (Cuadro 4) no se sobrepasó ningún día de medición la norma nacional para 24 horas que corresponde a 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual forma, al observar los promedios anuales de ambos puntos, se pudo establecer que no se supera la norma nacional que establece 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como valor de comparación.

En la figura 2, se muestra el comportamiento de los promedios mensuales de concentraciones de material particulado PM_{10}

obtenidos para el sitio ubicado en la Catedral Metropolitana de San José, de manera que se puede inferir que durante la época seca (diciembre-abril) los valores tienden a ser menores que los promedios registrados durante la época lluviosa (mayo-noviembre). Lo anterior se podría explicar debido al hecho de que durante la época seca, la velocidad promedio del viento es alrededor de un 55% mayor a la registrada en la época lluviosa, por lo que hay una mayor capacidad de remoción de contaminantes y un descenso en las temperaturas promedio registradas. En forma adicional, durante los meses de diciembre y enero, la mayoría de instituciones educativas del país se encuentra en período de vacaciones, con lo cual disminuye considerablemente el flujo vehicular en la Ciudad. La dirección de los vientos en la Ciudad de San José es predominantemente Noreste-Este durante todo el año, sin cambios significativos.

Al analizar la matriz de correlaciones de Pearson (Cuadro 5) existente entre los promedios mensuales de PM_{10} y las variables meteorológicas, se puede constatar que la temperatura es el único parámetro que presenta una correlación significativa con los niveles de material particulado. Es importante destacar que la velocidad del viento determina el

Cuadro 5. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson aplicada a las concentraciones de material particulado PM_{10} y las variables meteorológicas registradas en la Ciudad de San José, Costa Rica: Año 2005-2006.

	PM_{10}	Lluvia	Temperatura	Velocidad del viento
PM_{10}	1,000			
Lluvia	0,344	1,000		
Temperatura	0,580	0,413	1,000	
Velocidad del viento	-0,398	-0,879	-0,639	1,000

Los valores en negrilla representan $p < 0,02$ y $n = 13$.

Cuadro 6. Promedios anuales de la concentración de aniones presentes en el material particulado PM_{10} para los dos puntos de monitoreo de la Ciudad de San José, año 2005-2006.

Anión	Valor máximo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor mínimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Promedio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Desviación estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Varianza ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ²
Catedral Metropolitana de San José						
Sulfato	13,85	1,08	4,50	2,88	3,74	14,0
Nitrato	3,21	0,20	0,91	0,82	0,47	0,22
Cloruro	3,61	0,45	1,23	1,10	0,68	0,47
Junta de Educación de San José						
Sulfato	10,38	0,88	3,40	2,98	1,71	2,92
Nitrato	3,68	0,23	0,97	0,78	0,67	0,44
Cloruro	5,19	0,40	1,20	1,02	0,89	0,79

Cuadro 7. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson aplicada a las concentraciones de material particulado PM_{10} , aniones y variables meteorológicas registradas en la Ciudad de San José, Costa Rica: año 2005-2006.

	PM_{10}	Lluvia	Temperatura	Velocidad del viento	Sulfato	Nitrato	Cloruro
PM_{10}	1,000						
Lluvia	0,344	1,000					
Temperatura	0,580	0,413	1,000				
Velocidad del viento	-0,398	-0,879	-0,639	1,000			
Sulfato	0,583	0,255	0,459	-0,419	1,000		
Nitrato	0,417	0,326	0,343	-0,245	0,576	1,000	
Cloruro	-0,601	-0,822	-0,710	0,898	-0,300	-0,537	1,000

Los valores en negrilla representan $p < 0,05$ y $n = 13$.

Cuadro 8. Matriz de valores para los componentes principales obtenidos de los muestreos de material particulado PM_{10} en la Ciudad de San José, año 2005-2006.

VARIABLES	PC1	PC2
PM_{10}	0,711	0,489
Lluvia	0,801	-0,495
Temperatura	0,793	0,219
Velocidad del viento	-0,887	0,342
Sulfato	0,450	0,587
Nitrato	0,115	0,538
Cloruro	-0,947	0,229

Los valores de $PC > 0,5$ se consideran significativos.

comportamiento de las precipitaciones y la temperatura promedio registrada en la Ciudad de San José durante el período de muestreo.

Concentración de aniones presentes en el material particulado PM_{10}

Al analizar los promedios anuales obtenidos para la concentración de sulfatos, nitratos y cloruros en material particulado PM_{10} , se pudo observar que las concentraciones para ambos sitios no son significativamente

diferentes a un nivel de significancia del 5% (Cuadro 6).

Si se compara los valores obtenidos para el contenido de sulfatos en material particulado PM_{10} con los reportados por Mariani et al. (2007) para Río de Janeiro ($1,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y por Moya et al. (2003) para la Ciudad de México ($3,54 \mu\text{g}/\text{m}^3$), se puede observar que las medias en la Ciudad de San José son mayores a las registradas para ambos sitios, debido probablemente a la utilización en Costa Rica de combustibles fósiles con alto contenido de azufre, cuya presencia en el caso del diesel oscila entre 4000 – 4500 ppm, según datos de la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

El análisis de componentes principales se aplicó al conjunto de variables químicas, con el fin de determinar la influencia de fuentes antropogénicas o naturales en la composición del material particulado recolectado en el área de estudio, realizando una interpretación y evaluación adecuadas de las interrelaciones existentes en el set de datos en estudio. El software utilizado fue SYSTAT para Windows, versión 11.

Para realizar este análisis estadístico se utilizó los promedios mensuales y desviaciones estándar de las concentraciones de los aniones presentes en el material particulado y las variables

meteorológicas para los sitios de muestreo. En la primera etapa, se utilizó la matriz de correlaciones de Pearson (Cuadro 7) como insumo para el análisis de componentes principales.

Al aplicar el análisis de componentes principales, se puede observar que el 73% de la varianza de los datos crudos se debe a dos factores (Cuadro 8), cuyos valores de Eigen son mayores a uno. En forma adicional, se aplicó la rotación varimax al set de datos con el fin de interpretar mejor los componentes extraídos. El primer factor PC1 explica aproximadamente el 58% de la varianza total de los datos y muestra una importante correlación entre

la concentración de material particulado PM_{10} , la temperatura y las precipitaciones, mientras que el segundo factor PC2, responsable del 15% de la varianza total, relaciona fuertemente las concentraciones de material particulado, sulfato y nitrato, infiriendo una fuerte contribución antropogénica.

Cabe mencionar la fuerte correlación existente entre los niveles de cloruros presentes en el material particulado y las variables meteorológicas, específicamente, la velocidad del viento y las precipitaciones, lo cual permite destacar la influencia marina, sobre todo si se toma en cuenta que la dirección del viento predominante en la Ciudad de San José es este-noreste procedente de la costa atlántica del país, tal como se muestra en la trayectoria reportada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (figura 3). Los promedios mensuales de cloruros presentes en el material particulado son mayores en época seca que en época lluviosa, cuando las velocidades del viento son mayores hasta en un 55%.

Dióxido de nitrógeno

Al analizar los promedios anuales obtenidos para este gas (Cuadro 9), se pudo observar que en al menos tres sitios de la Ciudad (Hospital San Juan de Dios, Catedral Metropolitana y Avenida 10) se supera el valor recomendado por la Organización Mundial de la Salud como referencia mensual de NO_2 ($40 \mu g/m^3$). Es importante aclarar que dichos sitios se encuentran localizados en los principales accesos a la ciudad por los sectores norte y oeste, además de constituir vías con mayor flujo vehicular.

Se utilizó el análisis de componentes principales para estudiar las variaciones espaciales de la concentración de dióxido de nitrógeno en los 14 sitios de muestreo ubicados en la Ciudad de San José. Janssen et al. (1989) ha utilizado esta herramienta estadística con anterioridad para distinguir

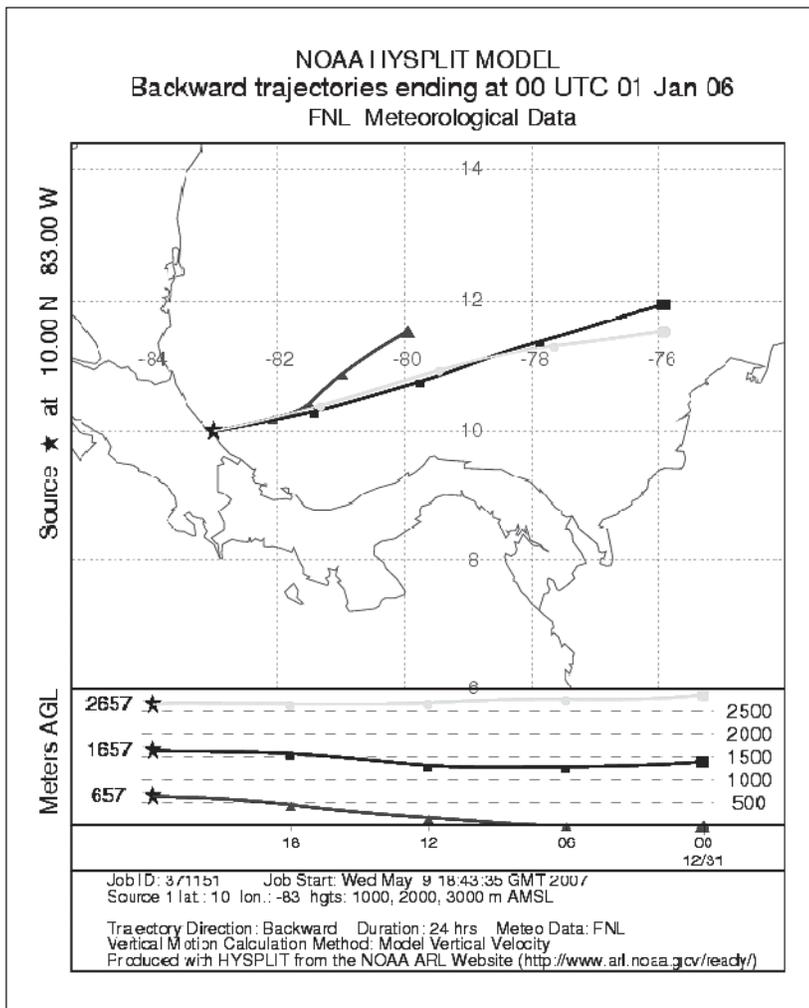


Figura 3. Trayectoria de vientos generada por el modelo Hysplit del NOAA para la Ciudad de San José, enero 2006.

Cuadro 9. Promedios anuales de la concentración de dióxido de nitrógeno para los sitios de monitoreo ubicados en la Ciudad de San José, año 2005-2006.

Sitio de monitoreo	Valor máximo (µg/m³)	Valor mínimo (µg/m³)	Promedio (µg/m³)	Mediana (µg/m³)	Desviación estándar (µg/m³)	Varianza (µg/m³)²
1	57	36	48	48	6,0	36
2	60	36	46	43	6,9	47,2
3	45	25	32	30	6,6	44,1
4	53	32	43	42	6,2	38,1
5	34	22	27	27	4,1	17,1
6	42	20	27	24	6,2	38,6
7	45	15	28	25	8,3	69,2
8	38	19	25	23	5,8	34,2
9	31	14	22	21	5,7	32,7
10	54	16	35	38	11,1	123,1
11	40	30	35	34	3,8	14,2
12	48	18	30	25	9,8	96,1
13	37	17	25	25	6,5	42,1
14	43	21	34	37	6,4	40,4

Cuadro 10. Resumen de los resultados del análisis de componentes principales, utilizando los promedios mensuales de NO₂ registrados para los 14 sitios ubicados en la Ciudad de San José, año 2005-2006.

	Primer Componente	Segundo Componente	Tercer Componente
Varianza Total Explicada	29%	2%	1%
Factores con valores < 0		Sitio 3 -0,800 Sitio 5 -0,550 Sitio 10 -0,306	Sitio 12 -0,515 Sitio 7 -0,424 Sitio 4 -0,416
Factores con valores > 0	Valores mayores: Sitio 1 0,990 Sitio 6 0,954 Sitio 13 0,931 Sitio 9 0,913 Sitio 11 0,867 Valores menores: Sitio 3 0,465	Sitio 12 0,693 Sitio 11 0,321	Sitio 8 0,434 Sitio 1 0,270 Sitio 3 0,235

entre fenómenos locales y de larga escala en el análisis de contaminación del aire.

El valor y signo de cada uno de los factores que conforman los componentes principales permite diferenciar si las características de las fuentes de emisión locales afectan las concentraciones locales de cada uno de los sitios de monitoreo. Estos resultados pueden ser utilizados para validar la clasificación de los sitios de monitoreo. El cuadro 10 resume los resultados del análisis estadístico para los datos promedio mensuales de dióxido de nitrógeno en el período 2005-2006.

El porcentaje de la varianza total (Varianza = $\sum (X_{\text{modelo}} - X_{\text{medida}})^2$) explicado por el primer factor corresponde a un 29%, lo cual implica que las concentraciones de NO₂ en los distintos sitios de monitoreo están fuertemente correlacionadas (cambios en fase). Lo anterior indica que las variaciones en la concentración de este gas están determinadas principalmente por fenómenos de larga escala (meteorológicos). El segundo componente muestra valores negativos para los sitios ubicados al sur de la Ciudad y positivos para aquellos ubicados en el sector norte, lo que hace presumir un gradiente sur-norte con concentraciones menores en los sitios ubicados al sur de la Ciudad de San José.

Conclusiones

Durante el año 2005-2006, se registró en la Ciudad de San José niveles de material particulado PM₁₀ con valores promedio anuales por debajo de la norma nacional, la cual establece 50 µg/m³ como referencia (Decreto MINSALUD 30221). Sin embargo, es importante señalar que la concentración de sulfato presente alcanzó valores superiores a los registrados en ciudades como Río de Janeiro y México D.F., producto probablemente de los altos contenidos de azufre presentes en los combustibles que utiliza la flotilla vehicular.

El análisis de componentes principales indica que existe una fuerte correlación entre las concentraciones de sulfato y nitrato presentes en las partículas PM₁₀, señalando la contribución de fuentes antropogénicas. En el caso del cloruro, destaca la fuerte relación existente con los parámetros meteorológicos registrados durante el período de muestreo.

En el caso del dióxido de nitrógeno, los promedios mensuales resultaron ser superiores para tres de los 14 sitios ubicados en la Ciudad, superando la recomendación de la Organización Mundial de la Salud. Adicionalmente, se determinó que la variación en los niveles de este gas para todos los sitios se debió principalmente a fenómenos de larga escala (meteorológicos), con presencia de un gradiente sur-norte en ellos.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de los funcionarios de la Sección de Parques de la Municipalidad de San José y de la Dirección de Protección al Ambiente Humano del Ministerio de Salud de Costa Rica, por la colaboración en la toma de muestras durante el monitoreo.

De igual forma, se reconoce la valiosa colaboración del Instituto Meteorológico Nacional en el aporte de los datos correspondientes al período de monitoreo, para la estación ubicada en Barrio Aranjuez de la Ciudad de San José.

Bibliografía

- Bascom R., Bromberg P.A., Costa D.A., Devlin R., Dockery D.W., Frampton M.W., Lambert W., Samet J.M., Speizer F.E. y Utell M. (1996). *Health effects of outdoor air pollution. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 153, pp. 3-50.
- Dockery D. y Pope A. (1996). *Epidemiology of acute health effects: Summary of timeseries studied*. En: *Particles in our air: concentration and health effects* (ed. Spengler J.D., Wilson R.), pp. 123-147. Harvard University Press.

- Dockery D.W., Pope C.A., Xu X., Spengler J.D., Ware J.H., Fay M., Ferris B.G. y Speizer F.E. (1993). *An association between air pollution and mortality in six U.S. cities*. *New England Journal of Medicine* 329, pp. 753-1759.
- Finlayson-Pitts, B. y Pitts, J. (1986). *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 522-525.
- Herrera, J. y Rodríguez, S. (2005). Segundo Informe de Calidad del Aire de la Ciudad de San José. Informe Técnico, 35 pp.
- Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (2003). Compendio de Estadísticas del Cantón Central de San José. Informe Técnico, pp. 23-26.
- Janssen, L.H.J.M., Visser, H. y Rokmer, F.G. (1989). *Analysis of large-scale sulphate, nitrate, chloride and ammonium concentrations in the Netherlands using an aerosol measuring network*. *Atmospheric Environment* 23, pp. 2783-2796.
- Künzli N., Kaier R., Medina S., Studnicka M., Chanel O., Filliger P., Herry M., Jr. F.H., Puybonnieux-Texier V., Quénel P., Schneider J., Seethaler R., Vergnaud J.C. y Sommer H. (2000). *Public health impact of outdoor and traffic related air pollution: an European assessment*. *The Lancet* 356, pp. 795-801.
- Mariani, R. y De Mello, W. (2007). *PM_{2.5-10}, PM_{2.5} and associated water soluble inorganic species at a coastal urban site in the metropolitan region of Rio de Janeiro*. *Atmospheric Environment* 41, pp. 2887-2892.
- Mészáros E. (1999) *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai Kiado.
- Moya, M., Castro, T., Zepeda, M. y Baez, A. (2003). *Characterization of size-differentiated inorganic composition of aerosols in Mexico City*. *Atmospheric Environment* 37, pp. 3581-3591.
- Schwartz J. (1994). *What are people dying of on high air pollution days?* *Environmental Research* 64, 26-35.
- Schwartz J., Dochery D.W. y Neas L.M. (1996). *Is daily mortality associated specifically with fine particles?* *Journal of Air and Waste Management Association* N.º46, pp. 927-939.
- Strand V., Rak S., Svartengren M. y Bylin G., 1997. *Nitrogen dioxide exposure enhances asthmatic reaction to inhaled allergen in subjects with asthma*. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 155, pp. 881-887.
- Strand V., Svartengren M., Rak S., Barck C. y Bylin, G., 1998. *Repeated exposure to an ambient level of NO₂ enhances asthmatic response to a nonsymptomatic allergen dose*. *Eur. Respir. J.* 12, pp. 6-12.
- Warneck P. (1988). *Chemistry of the natural atmosphere*. *International Geophysics Series*. Wiley & Sons. Vol. 41. Academy Press, pp. 757.
- WHO (2002). *Guidelines for concentration and exposure-response measurement of fine and ultra fine particulate matter for use in epidemiological studies*. WHO Dietrich Schwela, Lidia Morawska, QUT, Dimitrios Kotzias, EC JRC. *Published on behalf of the European Commission*.