

**UNA**  
UNIVERSIDAD NACIONAL  
COSTA RICA



**TERCER INFORME DE CALIDAD  
DEL AIRE DE LA CIUDAD DE SAN  
JOSÉ**

**AÑO 2005-2006**

# Introducción

Los habitantes de la Gran Área Metropolitana del país han sido testigos en las últimas dos décadas del rápido y desordenado crecimiento que ha experimentado dicha región. Este crecimiento vino acompañado en la mayoría de los casos del desarrollo de una nueva y moderna infraestructura, pero también de un incremento desmedido del tráfico vehicular que ha traído como consecuencia un deterioro considerable en la calidad del aire que se respira. Este deterioro se puede ver reflejado en el aumento de los casos de enfermedades respiratorias reportados por los sistemas de salud pública de Costa Rica.

Sin embargo, la percepción de los sentidos no es un método confiable para medir los niveles de contaminación en el aire, y por eso 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 de 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 para 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 cuales sustancias y en que medida están sobre pasando 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, además sus efectos sobre la salud, plantas, animales y bienes materiales. Todo esto con el fin de encontrar cuales pueden ser los valores guías y límites más adecuados que

no frenen el desarrollo económico y que a la vez garanticen una calidad del aire segura.

Con la publicación de este informe, el Ministerio de Salud, la Municipalidad de San José y la Universidad Nacional tienen el propósito de contribuir a la difusión de la información referente al estado de la calidad del aire en la Ciudad de San José, desde una perspectiva de rigurosidad científica, que permita a toda aquella persona o institución interesada en los problemas relacionados con la calidad del aire y en la políticas gubernamentales que se siguen para resolver tales problemas, el conocimiento objetivo de la realidad con datos y estadísticas de la evolución de las tendencias que siguen los fenómenos ambientales.

Este documento forma parte de un esfuerzo sostenido de la Universidad Nacional para desarrollar alianzas estratégicas con otras instituciones, con el fin de construir y consolidar un Sistema de Información Ambiental, ya que durante mucho tiempo la ausencia de información confiable ha sido un impedimento para una adecuada planeación de las políticas ambientales, así como la realización de la evaluación de tales políticas, no sólo para el gobierno sino también para el resto de los actores que están involucrados en el estudio de la problemática ambiental.

Con la incorporación del Ministerio de Salud a partir del año 2005, se ha logrado ampliar la cobertura del programa de monitoreo de forma tal que ya se incluyeron todos los distritos que conforman el cantón central de San José, por lo que el próximo informe contendrá dichos resultados.

MSc. Jorge Herrera Murillo  
Licda. Susana Rodríguez Román

# Calidad del Aire: Conceptos

En teoría, el aire siempre ha tenido cierto grado de contaminación. Los fenómenos naturales tales como la erupción de volcanes, tormentas de viento, descomposición de plantas y animales e incluso los aerosoles emitidos por los océanos "contaminan" el aire. Se puede considerar como contaminante a la sustancia presente en mayor concentración a la natural como resultado de la actividad humana y que ejerce un efecto pernicioso sobre el ambiente. Estos efectos pueden alterar tanto la salud como el bienestar de las personas. Por lo general, los contaminantes del aire se clasifican en primarios o secundarios. Un contaminante primario es aquél que se emite a la atmósfera directamente de la fuente y mantiene la misma forma química, como por ejemplo, la ceniza de la quema de residuos sólidos. Un contaminante secundario es aquel que experimenta un cambio químico cuando llega a la atmósfera. Un ejemplo es el ozono que surge de los vapores orgánicos y óxidos de nitrógeno que emite una estación de gasolina o el escape de los automóviles. Los vapores orgánicos reaccionan con los óxidos de nitrógeno en presencia de luz solar y producen el ozono, componente primario del smog fotoquímico.

Cuando se discuten las fuentes de contaminación del aire, comúnmente se usan cuatro términos: móvil, estacionaria, puntual y del área. Las fuentes móviles incluyen diversas formas de transporte tales como automóviles, camiones y aviones. La principal fuente móvil de contaminación del aire es el automóvil, pues produce grandes cantidades de monóxido de carbono y menores cantidades de óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COVs). Las regulaciones para el control de emisiones de automóviles han reducido la cantidad de contaminantes lanzados al aire. Sin embargo, debido al creciente número de vehículos, los automóviles siguen siendo la principal fuente móvil de contaminación del aire.

Las fuentes estacionarias son las instalaciones no movibles, tales como establecimientos industriales. Una fuente puntual se refiere a una fuente en un punto fijo, tal como una chimenea o tanque de almacenamiento que emite contaminantes. Una fuente del área se puede relacionar con una serie de fuentes pequeñas que en conjunto pueden afectar la calidad del aire en una región.

Los contaminantes de aire también se han clasificado como contaminantes criterio y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterio se han identificado como comunes y perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó contaminantes criterio porque fueron objetos de estudios de evaluación publicados en documentos de criterios de calidad del aire. En el nivel internacional los contaminantes criterio son:

Monóxido de carbono (CO)

Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)

Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)

Ozono(O<sub>3</sub>)

Material particulado

Plomo(Pb)

A continuación se discuten y presentan los resultados obtenidos del monitoreo de algunos contaminantes criterio en el cantón central de San José, durante el período 2005-2006.

## **1. Material Particulado:**

El material particulado atmosférico se define como un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas (a 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 µm), 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 composición química, ambas condicionadas por la composición de los gases que las rodean. Los niveles de material particulado atmosférico se suelen expresar en forma de concentración de masa o número de partículas por unidad de volumen de aire ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$  o  $\text{n}/\text{cm}^3$ ).

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, en los ecosistemas como en los seres vivos (Aitken, 1880; Dockery et al., 1993; Schwartz, 1994 y 1996; Dockery y Pope, 1996; Arimoto, 2001). Con objeto de minimizar el impacto ambiental y en la salud es necesario poner en funcionamiento estrategias de control y reducción de las emisiones de material particulado atmosférico, aunque para que éstas sean efectivas deben realizarse de forma paralela con la reducción de las emisiones de gases precursores.

El diámetro de las partículas atmosféricas en suspensión varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras ( $\mu\text{m}$ ). Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados "modas", que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa (Warneck, 1988; EPA, 1996; Seinfeld y Pandis, 1998). En general, la granulometría y la composición química del material particulado suelen ser características del foco emisor. La denominación de las partículas incluidas en determinados rangos granulométricos varía en función del ámbito de estudio, ya sea en ciencias atmosféricas o en epidemiología y calidad del aire. Así, como se verá más adelante, se denomina "partículas finas" en ciencias atmosféricas a aquellas partículas de diámetro  $<1\mu\text{m}$ , mientras que en epidemiología esta

definición abarca hasta las partículas de diámetro  $<2.5 \mu\text{m}$ . Consecuentemente, en estudios epidemiológicos se hace referencia a partículas gruesas a partir de  $2.5 \mu\text{m}$  de diámetro, mientras que en ciencias de la atmósfera se consideran gruesas las partículas de diámetro  $>1 \mu\text{m}$ .

Moda de nucleación ( $<0.02 \mu\text{m}$ ): la mayor concentración en número de partícula se encuentra entre 5-15 nm. Los únicos precursores gaseosos con capacidad para formar partículas por nucleación homogénea en aire ambiente son  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y  $\text{NH}_3$ . La vida media de estas partículas en la atmósfera es del orden de horas ya que coagulan rápidamente con otras partículas o incrementan de tamaño por condensación.

Moda Aitken ( $0.02-0.1 \mu\text{m}$ ): estas partículas pueden tener un origen primario (natural o antropogénico) o secundario (a partir de partículas de la moda de nucleación). Mucho se desconoce aún acerca de la composición química de estas partículas, aunque es muy probable que las de origen secundario se formen por procesos de coagulación a partir de la moda de nucleación, por condensación y/o por reacciones en fase líquida (con compuestos inorgánicos). La influencia de las emisiones antropogénicas en las partículas de la moda Aitken no está bien definida en la actualidad. Un ejemplo de un tipo de partícula que se acumula típicamente en esta moda es el carbono de origen primario (soot) con origen en procesos de combustión (mayoritariamente motores diesel). Estas partículas de carbono suelen presentar diámetros de partícula de aproximadamente 100 nm (y generalmente  $>30 \text{ nm}$ ), pudiendo llegar a alcanzar 150-200 nm (Matter et al., 1999).

El término "partículas ultrafinas" se utiliza en medicina para denominar partículas de  $<0.1 \mu\text{m}$ , que por tanto incluyen la moda de nucleación y la mayor parte de la moda Aitken. En algunas ocasiones este término se refiere únicamente a la moda de nucleación.

Moda de acumulación ( $0.1-1 \mu\text{m}$ ): la mayor densidad de partículas se registra entre 150-250 nm. En la atmósfera, las partículas de la moda Aitken crecen hasta formar parte de la moda de acumulación por medio de reacciones en fase líquida que

tienen lugar en gotas de agua en las nubes. La transferencia de masa es máxima en la nube a pesar del escaso tiempo de reacción, debido al elevado volumen de agua y la velocidad de reacción en las nubes. Aproximadamente el 90% del sulfato que se forma en la atmósfera es originado por la oxidación en fase líquida del dióxido de azufre en las nubes (Langner y Rodhe, 1992). El tiempo de residencia en la atmósfera es máximo para las partículas de esta moda.

Moda gruesa (>1  $\mu\text{m}$  en términos de aerosoles atmosféricos): en términos de calidad del aire y epidemiología esta moda comprende las partículas de diámetro >2.5  $\mu\text{m}$ . La mayor parte de las partículas en esta moda se forman por procesos mecánicos tales como la erosión de la superficie terrestre (materia mineral) o de otros materiales, o por la explosión de burbujas en la superficie de mares y océanos (aerosol marino). Tradicionalmente se ha considerado que el aerosol marino se encuentra en la moda gruesa, aunque recientemente Mårtensson et al. (2002) han demostrado que también se genera un elevado número de partículas de 20 nm. En masa, el predominio de las partículas gruesas es evidente. El crecimiento de las partículas de diámetro <1  $\mu\text{m}$  no puede dar lugar a partículas de diámetro >1  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, los procesos mecánicos que generan las partículas primarias no pueden normalmente producir partículas de diámetro <1  $\mu\text{m}$  debido a limitaciones energéticas. Consecuentemente, la transferencia de partículas entre diferentes modas se encuentra con un límite en torno a 1  $\mu\text{m}$ . Las partículas <1  $\mu\text{m}$  son denominadas partículas finas, mientras que aquellas de diámetro >1  $\mu\text{m}$  son gruesas.

La moda gruesa se caracteriza por presentar un reducido número de partículas pero una elevada masa. Aunque las partículas de origen primario dominan en esta moda, también es posible encontrar partículas de origen secundario. Estas partículas secundarias son formadas por reacciones químicas entre las partículas primarias de origen crustal o marino y gases presentes en la atmósfera, como ocurre por ejemplo en la reacción del ácido nítrico gaseoso con cloruro sódico o carbonato cálcico, que resulta en la formación de nitrato sódico o cálcico (Harrison y Pio, 1983; Querol et al., 1998) en el rango  $>1 \mu\text{m}$  debido al tamaño original de estos compuestos naturales.

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

Para realizar el muestreo del material particulado respirable, se seleccionaron dos puntos de monitoreo ubicados en la Ciudad de San José que 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, ubicado de 3 a 15 metros de una arteria del alto flujo vehicular con buena ventilación natural.

**Primer sitio de muestreo:**

**Localización:** En las instalaciones de la Junta de Educación de San José, a 8 m de la carretera y 2,5 m sobre el nivel del suelo.

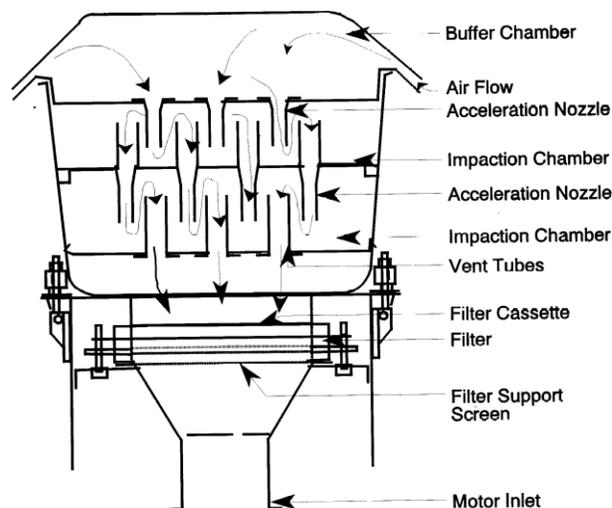
**Segundo Sitio de muestreo:**

**Localización:** En la esquina Noroeste de la Catedral Metropolitana de San José, a 5 m de la carretera y 3 m sobre el nivel del suelo.

La campaña de muestreo se realizó en el período de tiempo comprendido entre el 01 de setiembre de 2005 y el 31 de setiembre de 2006, para lo cual se recolectaron muestras tres veces por semana los días lunes, miércoles y viernes.

Para la toma de las muestras se utilizaron dos muestreadores de aire de alto volumen marca Thermo Andersen modelo MFC en donde el aire ambiente es aspirado en forma simétrica (independientemente de la dirección del viento), durante 24 horas, a través de la abertura circunferencial ubicada en la parte superior del cabezal (Figura 1). Una vez dentro del cabezal de muestreo, el flujo de aire se acelera a través de nueve boquillas impactadoras a una velocidad de 1,13 m<sup>3</sup>/min para después ser dirigido hacia la superficie de impactación. Debido a su momento, aquellas partículas que poseen diámetros aerodinámicos mayores a 10 µm quedan retenidas en la superficie de la cámara mientras que las restantes poseen la suficiente inercia como para continuar a través de un sistema de 16 boquillas de diámetro especificado hacia un filtro de fibra de vidrio.

El equipo cuenta con una bomba de vacío, la cual se encuentra conectada a un sensor de masa que permite no solo seleccionar el flujo de aire, al cual se realiza el muestreo, sino que también regula la potencia de la bomba para mantenerla constante a través de todo el período de muestreo. Además, el muestreador tiene incorporado un cronómetro con el fin de contabilizar el tiempo total de muestreo.



**Figura 1. Esquema de un muestreador de aire de alto volumen empleado en la recolección de material particulado PM-10.**

Una vez cada tres muestreos, se realizó la calibración del flujo del muestreador de aire comparando las lecturas de caída de presión generadas por el flujo al pasar por un orificio crítico calibrado VARIFLO modelo 454, con respecto a 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 tomaron registros de las condiciones promedio de temperatura y presión atmosférica con la ayuda de un anemómetro marca KESTREL modelo 5000.

En la recolección de las partículas, se utilizaron filtros de fibra de vidrio marca Whatman (CAT No 1829932, Grado G653) los cuales cumplen con las siguientes características:

*Tamaño:*  $(20,3 \pm 0,2)$  cm x  $(25,4 \pm 0,2)$  cm.

*Área expuesta:* 406.5 cm<sup>2</sup>

*Eficiencia de colección:* 99% mínimo para partículas de 0.3 μm de diámetro.

*Rango de la caída de presión:* 5.6 a 7.2 kPa (42 a 54 mm Hg), a un flujo de 1.5 m<sup>3</sup><sub>ptn</sub>/min a través del área expuesta.

*pH:* Con un rango de 6 a 10

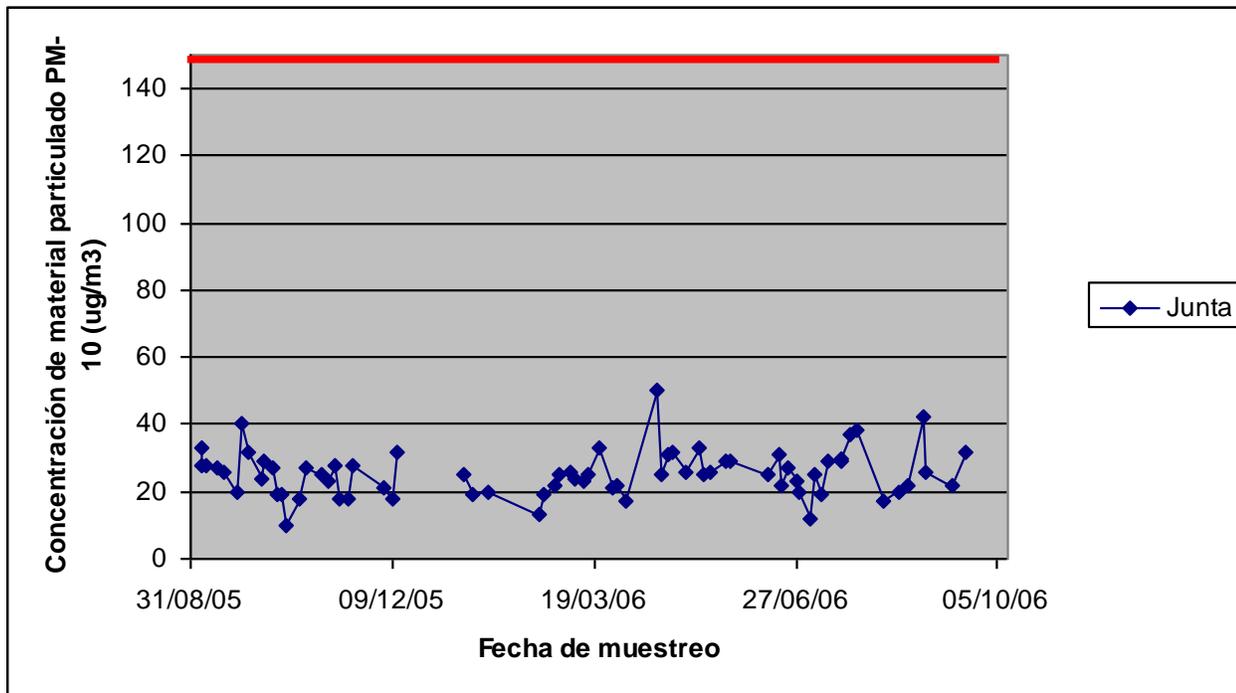
*Pérdida máxima de material del filtro:* 2.4 mg

*Resistencia a la tensión:* 500 g para una tira de 2 cm de ancho.

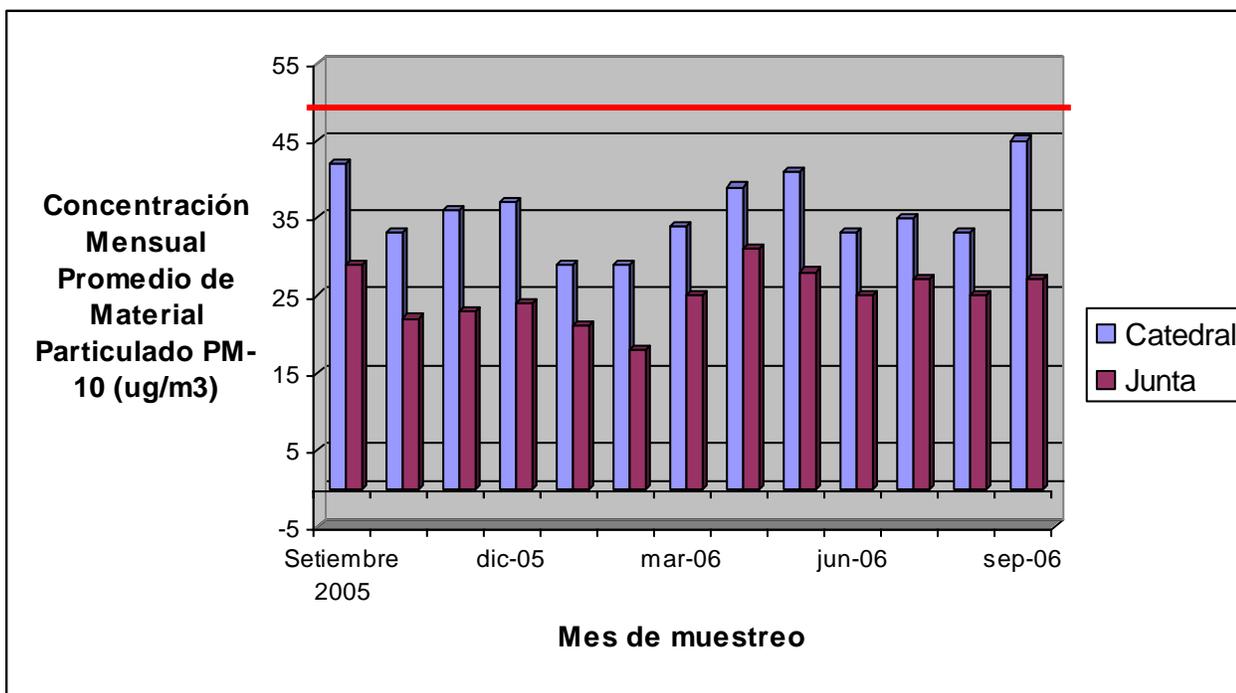
Dichos filtros se acondicionaron al menos 24 horas en una desecadora bajo las siguientes condiciones: temperatura 15-30°C y humedad menor al 40%) antes de ser pesados en balanza analítica, al inicio y después de la conclusión de los muestreos. El transporte de los filtros al campo se realizó en bolsas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

Al analizar los resultados obtenidos durante el período de monitoreo se puede observar que para ambos sitios de muestreo (figuras 2 y 3) no se sobrepasa en ningún día de medición, la norma nacional para 24 horas que corresponde a 150 ug/m<sup>3</sup>. De igual forma, al observar los promedios mensuales de ambos puntos se puede establecer que no se supera la norma nacional que establece 50 ug/m<sup>3</sup> como valor de comparación.

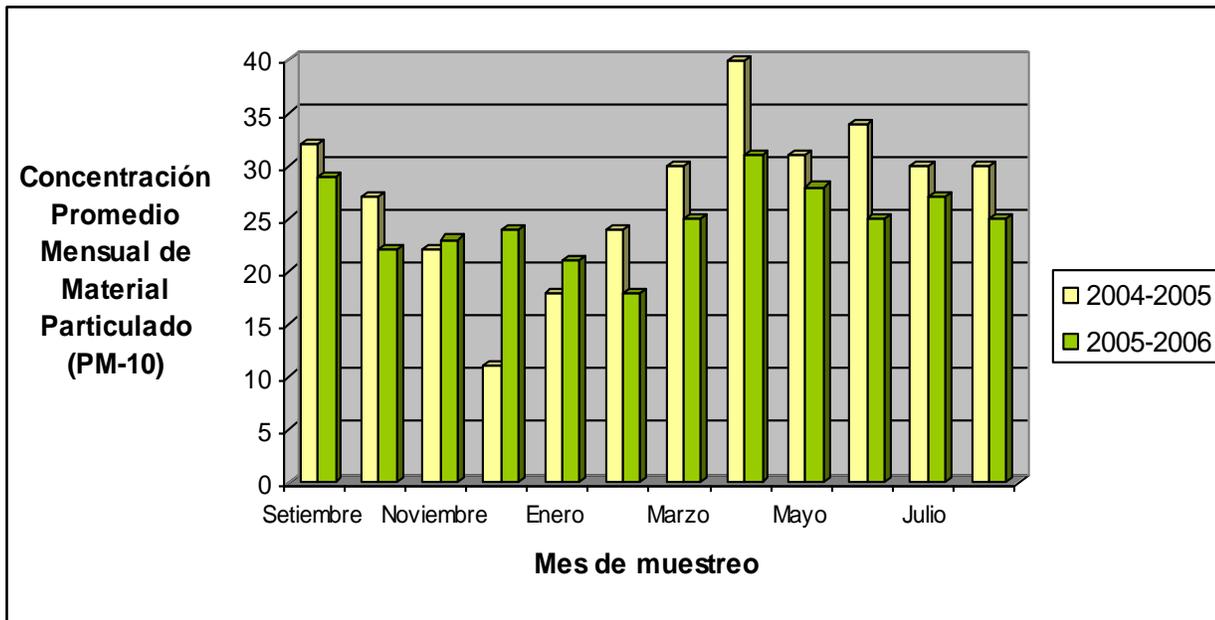




**Figura 3. Variación de la Concentración de material particulado PM-10 en el sitio de monitoreo ubicado en la Junta de Educación de San José durante al año 2005-2006**



**Figura 4. Variación de las concentraciones promedio mensuales de material particulado PM-10 obtenidas de setiembre 2005 a setiembre 2006 en los dos sitios de monitoreo.**



**Figura 5. Comparación de los promedios mensuales de concentración de material particulado PM-10 obtenidos en la Junta de Educación de San José durante los dos últimos años de monitoreo.**

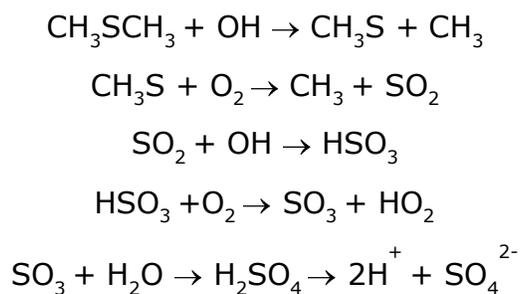
De tal forma que mientras en el año 2004-2005 se alcanzaron valores promedio anuales para la Catedral Metropolitana y la Junta de Educación de San José de 43 y 28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente, durante el año 2005-2006 estas concentraciones corresponden a 37 y 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Además de realizar mediciones de la concentración másica, se evaluó la composición fisicoquímica del material particulado con el fin de obtener los niveles de sulfato, nitrato, cloruro presentes mediante una extracción acuosa de una porción de los filtros, la cual se inyectó en un cromatógrafo de intercambio iónico con supresor de ionización. El objetivo de realizar estos análisis tiene como fin medir en forma aproximada el efecto de las reacciones atmosféricas que generan material particulado secundario a partir de gases, que son emitidos directamente tanto desde fuentes primarias fijas como móviles, sobre la calidad del aire.

## 2. Sulfato presente en el material particulado PM-10:

Los sulfatos presentes en la atmósfera son generalmente partículas de origen secundario, ya que no son emitidos directamente a la atmósfera sino que se generan mayoritariamente como resultado de la oxidación de precursores gaseosos (principalmente  $\text{SO}_2$ ). El diámetro de este tipo de partícula suele ser  $< 1\mu\text{m}$  (EPA, 1996). También existen fuentes naturales y antropogénicas de sulfatos primarios, como los yacimientos yesíferos o los procesos industriales de producción de ácido sulfúrico y la producción y manipulación de productos minerales tales como el yeso. Los compuestos de S representan aproximadamente el 7-10% de las emisiones globales a nivel terrestre (IPCC, 1996).

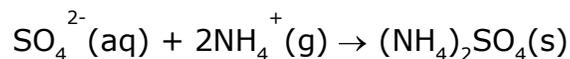
Los gases de origen natural precursores de los sulfatos son esencialmente emitidos a través de emisiones biogénicas y durante las emisiones volcánicas (Andrae y Crutzen, 1997). Sobre la superficie de los mares y océanos es posible encontrar una amplia variedad de compuestos orgánicos y microorganismos que emiten gases sulfurados, entre los cuales se encuentran el dimetil-sulfuro (DMS,  $\text{CH}_3\text{SCH}_3$ ) y el carbonil-sulfuro (COS) (Sieburth, 1982; Andreae, 1986). La ruptura de burbujas de aire arrastra parte de estos compuestos, por lo que es frecuente detectar un reducido porcentaje de materia orgánica de forma conjunta con el aerosol marino. El DMS emitido es considerado uno de los principales precursores de los sulfatos atmosféricos en regiones remotas de los océanos, ya que se oxida a  $\text{SO}_2$  a través de diferentes reacciones para formar finalmente  $\text{SO}_4^{2-}$  según (Harrison y van Grieken, 1998; Mészáros, 1999):



Las emisiones volcánicas constituyen la segunda fuente de SO<sub>2</sub> natural, al inyectar grandes cantidades a niveles elevados en la atmósfera. El origen de los óxidos de azufre en estas emisiones se encuentra en el fraccionamiento de compuestos volátiles de azufre en la cámara magmática antes de la erupción (Keppler, 1999).

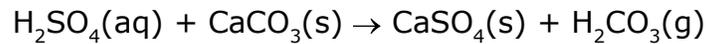
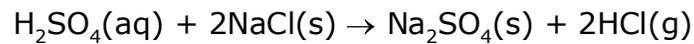
Los sulfatos de origen no natural, por otra parte, constituyen la fracción principal del material particulado atmosférico antropogénico, y las emisiones antropogénicas a su vez se encuentran en el origen de entre 60-80% del S en la atmósfera a escala global (Chuang et al., 1997).

La producción antropogénica de gases precursores de los sulfatos de origen secundario se centra esencialmente en procesos de combustión de combustibles fósiles con alto contenido en S, mayoritariamente carbón y fuel-oil en centrales térmicas y complejos industriales (la combustión de carbón supone en 60% de las emisiones de sulfato antropogénico, el petróleo supone el 28%, según Warneck, 1988). El principal compuesto gaseoso emitido es SO<sub>2</sub>, que se oxida a H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> con una velocidad que varía entre 1-10%/hora en función de las condiciones meteorológicas (Hidy, 1994). Numerosos estudios demuestran que la velocidad de formación de sulfato es función de la intensidad de la radiación solar (Mészáros, 1973; Mészáros y Vissy, 1974; Heintzenberg, 1985). La presión de vapor del ácido sulfúrico es muy reducida, por lo que este compuesto no se encuentra en fase gaseosa en la troposfera (Mészáros, 1999). Así, el ácido sulfúrico gaseoso formado en la atmósfera por medio de reacciones químicas condensa rápidamente para formar diminutas gotas de una solución de ácido sulfúrico. Bajo condiciones atmosféricas normales estas partículas ácidas acuosas son parcial o totalmente neutralizadas por amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), dando lugar a la formación de sulfato amónico [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>] (Junge, 1963):

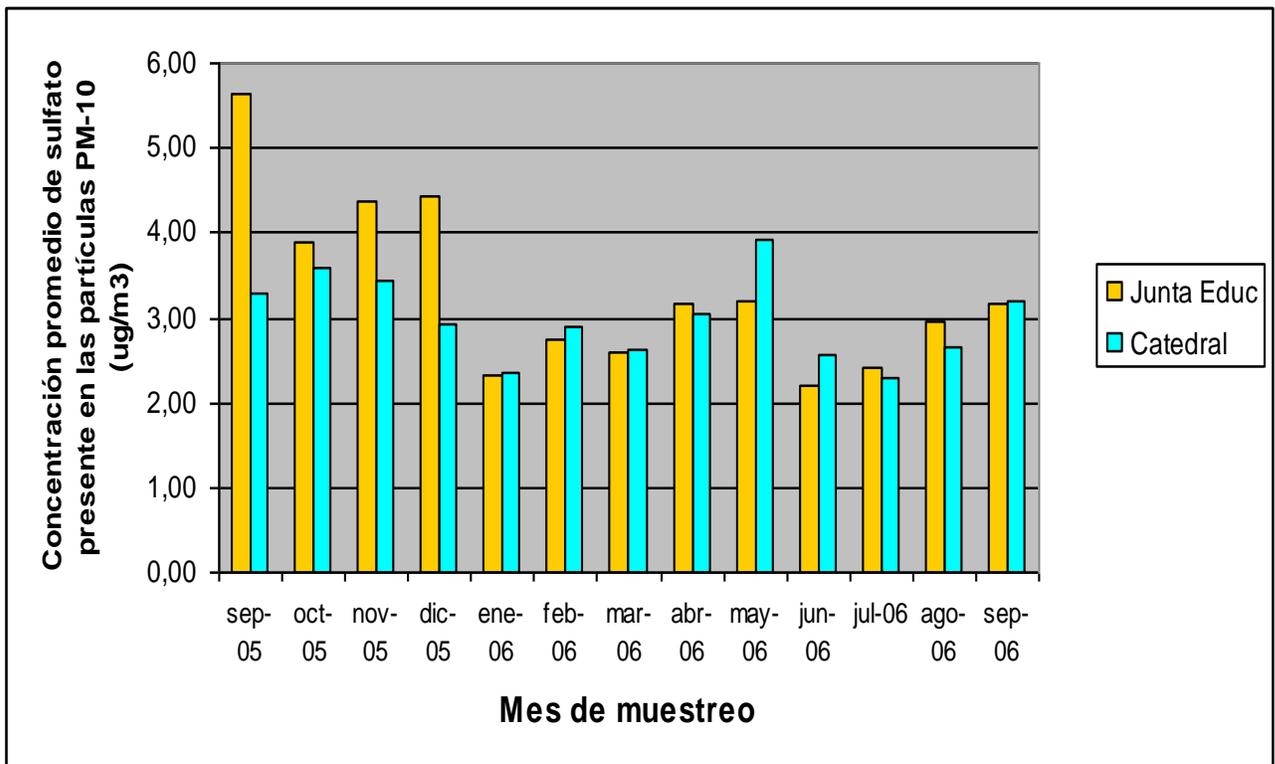


Debido a su reducido diámetro de partícula (0.16-0.53 μm, Leck y Persson, 1996), este compuesto posee una elevada estabilidad atmosférica, de modo que con frecuencia es utilizado como trazador de procesos de transporte a larga distancia (Warneck, 1988; Seinfeld y Pandis, 1998; Mészáros, 1999). En ambientes con

concentraciones bajas de  $\text{NH}_4^+$  y elevadas de Na y/o Ca) es posible obtener también la neutralización del sulfato según las reacciones (Querol et al., 1996 y 1998):



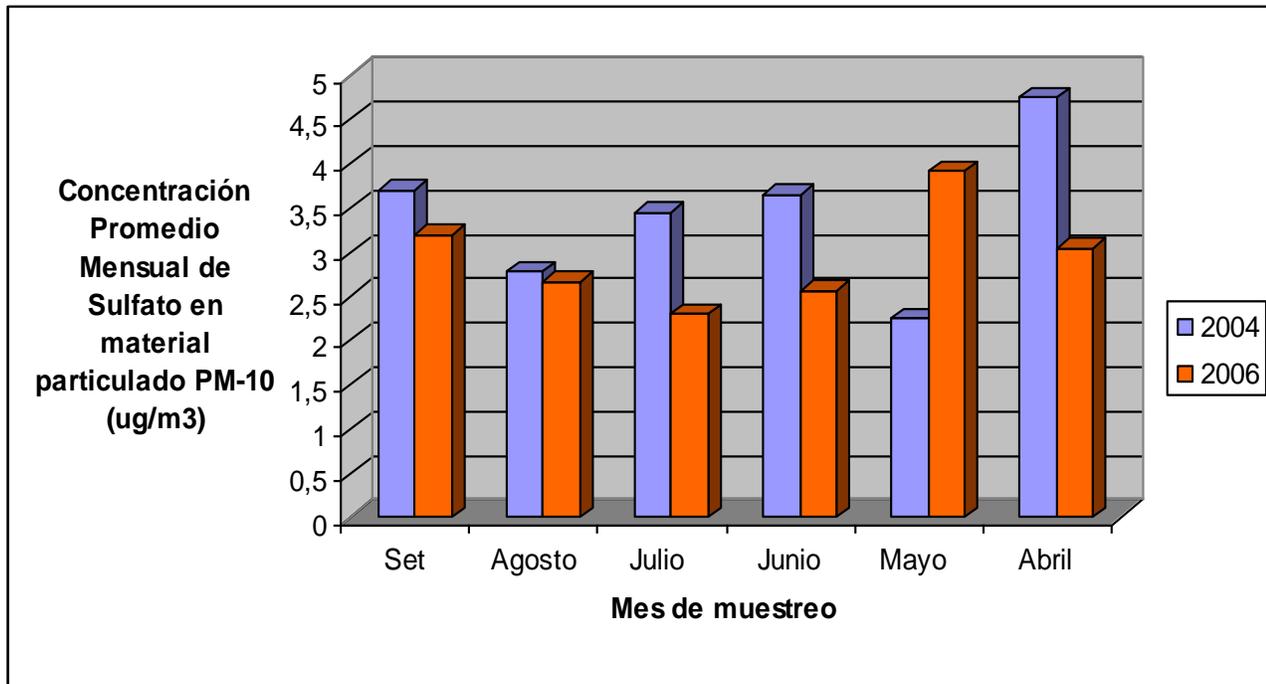
y la consecuente formación de sulfato sódico y cálcico particulado en suspensión.



**Figura 5. Variación de las concentraciones promedio mensuales de sulfato en material particulado PM-10 obtenidas de setiembre 2005 a setiembre 2006 en los dos sitios de monitoreo.**

Al analizar los resultados obtenidos para el análisis de la concentración de sulfato presente en el material particulado PM-10 se puede notar como durante el año 2006 se presenta un disminución en los niveles si se compara con los valores obtenidos para el último trimestre del año 2005. Al igual que en años anteriores las diferencias entre los promedios obtenidos no son significativamente diferentes entre ambos sitios de muestreo.

Es importante analizar estos datos tomando en cuenta las diferencias de patrones meteorológicos presentes para ambos años, ya que no necesariamente la disminución se debe a una mejora real en las condiciones de calidad del aire.



**Figura 6. Variación de las concentraciones promedio mensuales de sulfato en material particulado PM-10 obtenidas en los años 2004 y 2006 para el sitio de monitoreo ubicado en la Catedral Metropolitana de San José.**

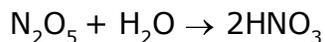
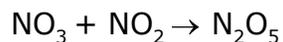
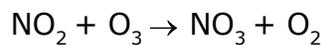
### **3. Nitrato presente en el material particulado**

Los compuestos de N en la atmósfera (principalmente  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ), al igual que los sulfatos, son de origen mayoritariamente secundario y provienen de la reacción de precursores gaseosos naturales y antropogénicos. Estos compuestos representan aproximadamente el 2-5% de las emisiones globales a nivel terrestre (IPCC, 1996). El diámetro de las partículas atmosféricas resultantes suele ser también  $< 1\mu\text{m}$  (EPA, 1996). Los compuestos nitrados de origen natural se suelen originar a partir de las emisiones de los suelos (nitrificación,  $\text{N}_2\text{O}$ ), los incendios forestales ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}$ ), las descargas eléctricas ( $\text{NO}$ ) y las emisiones biogénicas ( $\text{NH}_3$ ) (Seinfeld y Pandis, 1998). Las emisiones

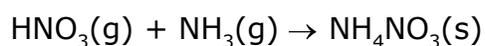
naturales de NO y NO<sub>x</sub> a escala global constituyen sólo la tercera parte de las emisiones antropogénicas (Mészáros, 1993).

En cuanto a los precursores gaseosos de los nitratos de origen antropogénico, en la actualidad se conocen numerosas fuentes emisoras entre las cuales destacan la producción eléctrica (combustión de gas, fuel-oil y carbón) y otros procesos de combustión a temperaturas elevadas (capaces de oxidar el N<sub>2</sub> atmosférico) tales como los que ocurren en los motores de los vehículos y la quema de biomasa.

Los principales gases emitidos por fuentes naturales y antropogénicas son así NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y NH<sub>3</sub>, cuya oxidación en la atmósfera tiene como resultado más frecuente la formación de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) (Warneck, 1988; Mészáros, 1999):



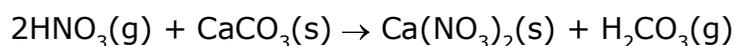
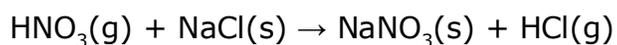
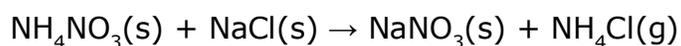
y amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). La velocidad de reacción de OH con NO<sub>2</sub> es diez veces superior a la registrada entre OH y SO<sub>2</sub>, por lo que la formación de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en la atmósfera será siempre más lenta que la de HNO<sub>3</sub> (Gillani y Wilson, 1983). Por otra parte, los datos existentes en la literatura acerca de la reacción denominada amonificación [NH<sub>3</sub>(g) → NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(s)] en la atmósfera (a diferencia de en los suelos) son en general insuficientes para comprender el sistema (Warneck, 1988; Seinfeld y Pandis, 1998). En condiciones normales, el ácido nítrico gaseoso disuelto en micro-partículas líquidas reacciona con el amonio presente en la atmósfera (originado a partir de fuentes naturales y antropogénicas) para dar lugar a la formación de nitrato amónico particulado (EPA, 1996):



Sin embargo, este producto presenta una considerable inestabilidad termodinámica debido a la alta presión de vapor de NH<sub>3</sub> y HNO<sub>3</sub> (Warneck,

1988; EPA, 1996; Adams et al., 1999; Mészáros, 1999), y a temperaturas elevadas ( $>20-25^{\circ}\text{C}$ ) se volatiliza para dar lugar de nuevo a ácido nítrico gaseoso. Es por ello que el nitrato amónico suele presentar una marcada estacionalidad con máximos invernales y mínimos estivales en entornos como la Península Ibérica (Stelson et al., 1979, Mészáros y Horváth, 1984, Willison et al., 1985, Seidl et al., 1996; Querol et al., 1998 y 2001). Una consecuencia importante de la elevada presión de vapor del nitrato amónico es el hecho de que en medio ácido (por ejemplo, sulfatos ácidos no neutralizados por amonio), se produce la disociación del nitrato amónico (Gebhart et al., 1994) y la consecuente formación de sulfato amónico. De esta manera, en medio ácido, la formación de nitrato amónico estará siempre supeditada a la previa neutralización por amonio de los sulfatos atmosféricos (formación de sulfato amónico). Ello explica también la mayor estabilidad atmosférica del sulfato amónico y su uso como trazador de transporte a larga distancia.

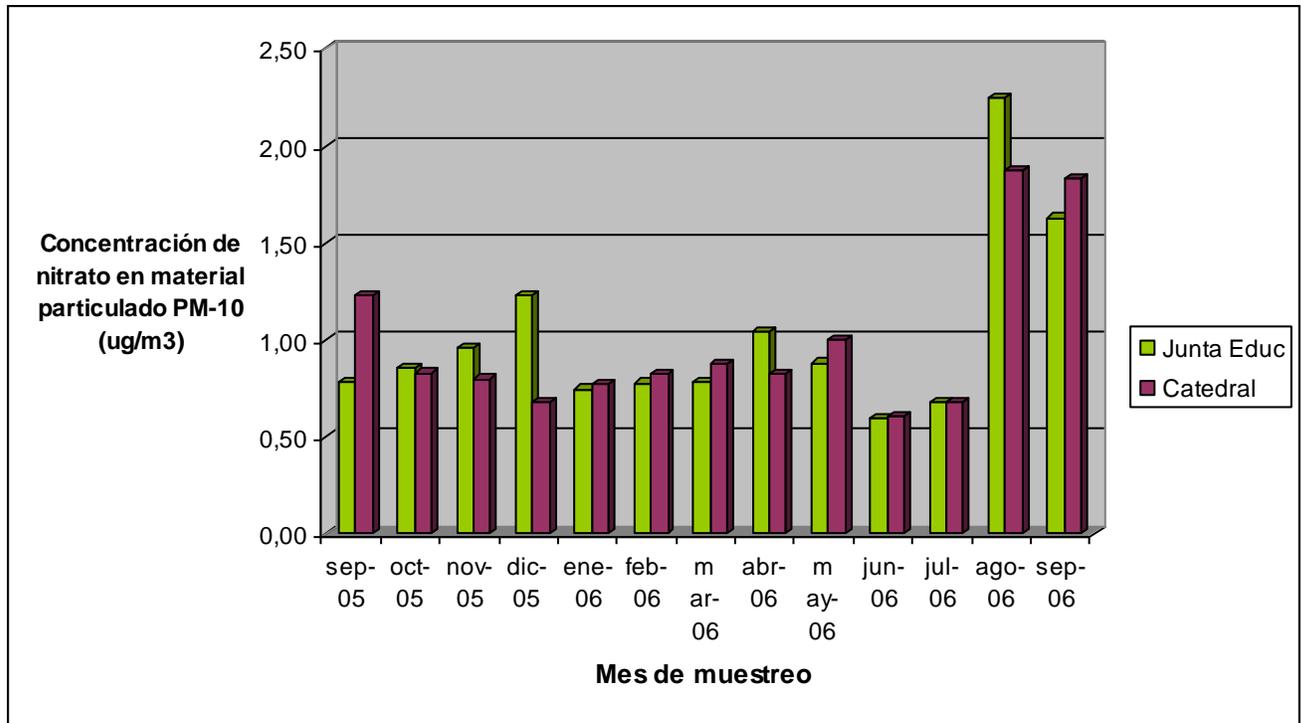
Al igual que se detecta en el caso del sulfato atmosférico, el nitrato no aparece siempre en forma de nitrato amónico. En medios ácidos y en ambientes con elevadas concentraciones de Na y Ca es posible registrar también la presencia de  $\text{NaNO}_3$  y  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  particulado de origen secundario, formados a partir de las reacciones (Harrison y Pio, 1983; Warneck, 1988; Harrison y Kito, 1990; Wakamatsu et al., 1996; Pio y Lopes, 1998; Querol et al., 1998):



Si se analizan los valores promedio de nitrato presente en material particulado recolectado en ambos puntos, se puede observar que no hay diferencias significativas en los datos obtenidos para ambos sitios ya que los promedios, son 1,01 y 0,99  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para la Catedral Metropolitana y la Junta de Educación de San José respectivamente.

Por último al comparar estas cifras con las alcanzadas en el período 2004-2005, se puede inferir que el nivel de nitrato se mantuvo relativamente

constante, ya que los promedios registrados en ese período fueron de 0,96 y 1,05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Catedral y Junta de Educación).



**Figura 7. Variación de las concentraciones promedio mensuales de nitrato en material particulado PM-10 obtenidas de setiembre 2005 a setiembre 2006 en los dos sitios de monitoreo.**

#### 4. Dióxido de nitrógeno

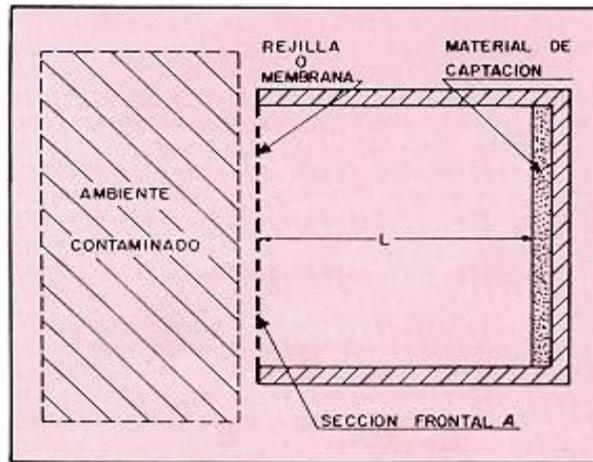
Los óxidos de nitrógeno son una mezcla de gases compuestos de nitrógeno y oxígeno. El monóxido de nitrógeno y el dióxido de nitrógeno constituyen dos de los óxidos de nitrógeno más importantes toxicológicamente; ninguno de los dos es inflamable y son de incoloros a pardos en apariencia a temperatura ambiente. El monóxido de nitrógeno es un gas de olor dulce penetrante a temperatura ambiente, mientras que el dióxido de nitrógeno tiene un fuerte olor desagradable. El dióxido de nitrógeno es un líquido a temperatura ambiente, pero se transforma en un gas pardo-rojizo a temperaturas sobre 70 F. Los óxidos de nitrógeno son liberados al aire desde el escape de vehículos

motorizados, de la combustión del carbón, petróleo o gas natural, y durante procesos tales como la soldadura al arco, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita. También son producidos comercialmente al hacer reaccionar el ácido nítrico con metales o con celulosa. Los óxidos de nitrógeno son usados en la producción de ácido nítrico, lacas, tinturas y otros productos químicos.

Los niveles bajos de óxidos 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, 1 ó 2 días luego de la exposición. Respirar altos niveles de óxidos de nitrógeno puede rápidamente producir quemaduras, espasmos y 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.

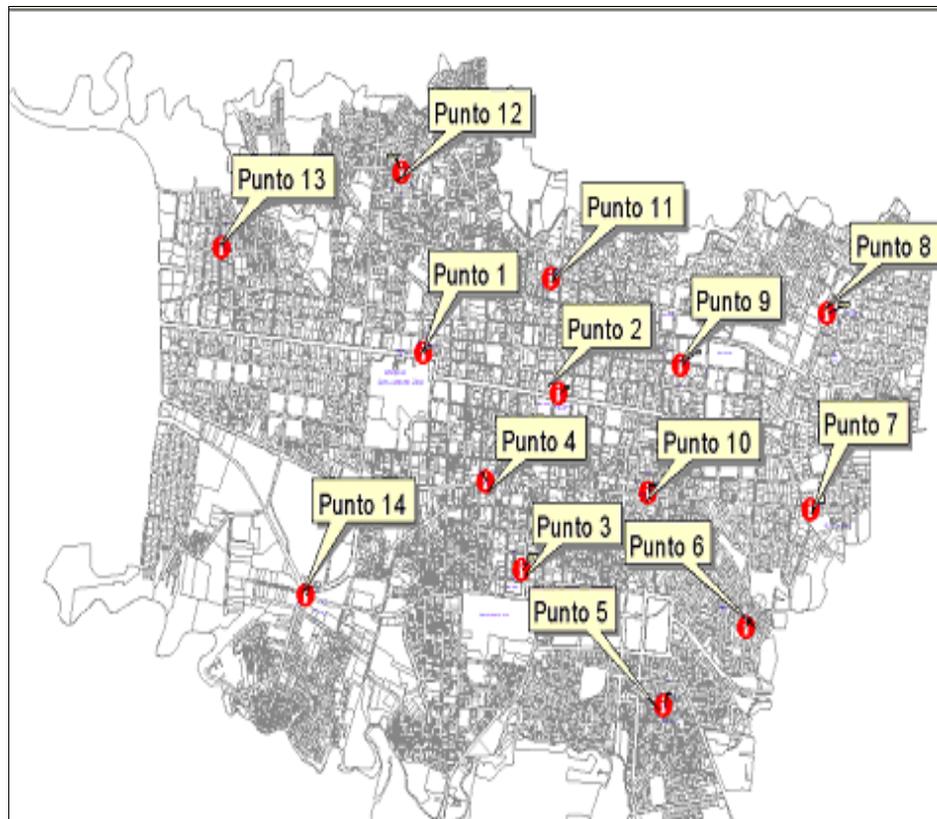
Para la determinación de los niveles de dióxido de nitrógeno se utilizó el método de muestreo pasivo.

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 que responda al esquema representado en la figura 10, 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.



**Figura 8. Esquema de un dispositivo de muestreo pasivo.**

Para el monitoreo de dióxido de nitrógeno en la ciudad de San José se ubicaron 14 puntos, como se observa en el mapa de la figura 9.

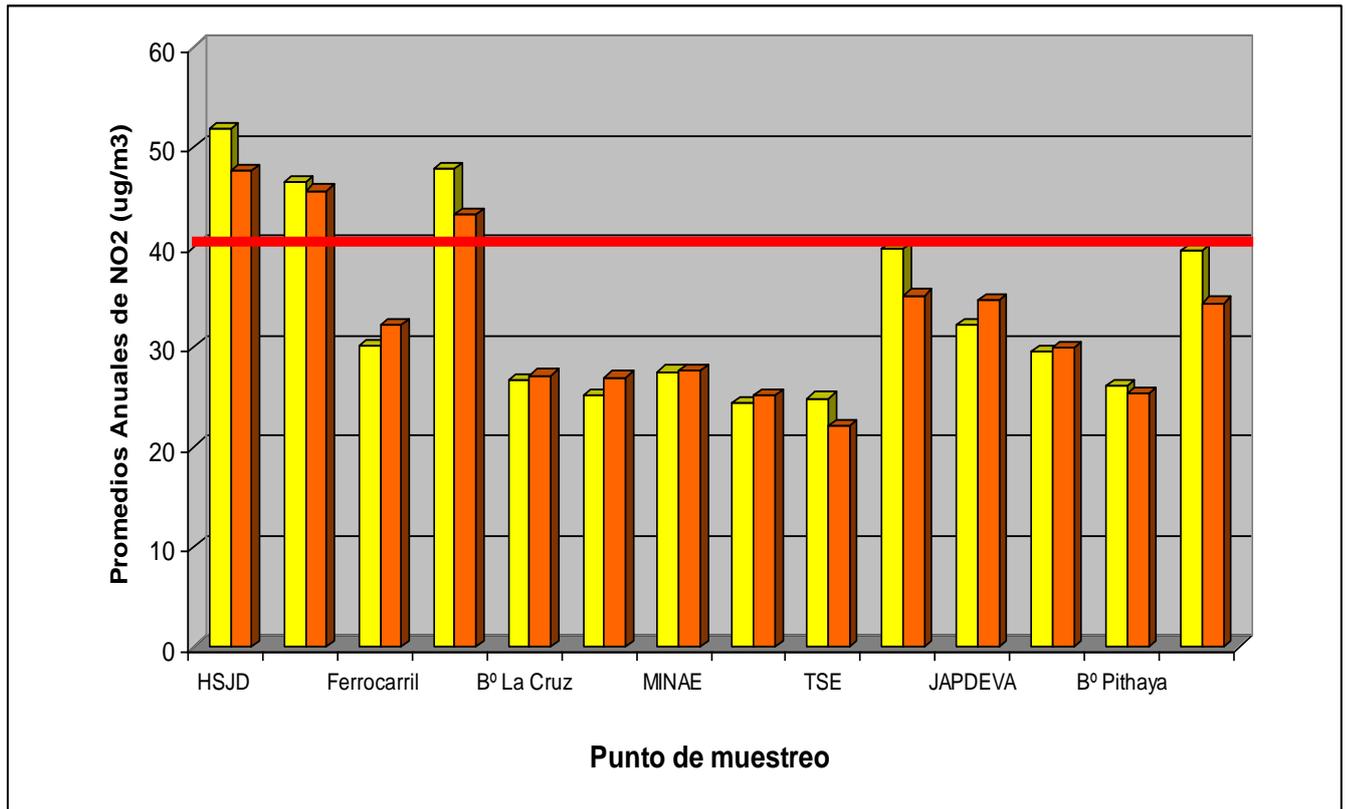


**Figura 9. Ubicación de los puntos de monitoreo de dióxido de nitrógeno por difusión pasiva en el cantón central, provincia de San José.**

La ubicación de cada uno de los puntos es la siguiente:

Punto de muestreo	Ubicación
1	Frente al Hospital San Juan de Dios
2	Frente al costado norte de la Catedral Metropolitana
3	150 m norte de la antigua estación del ferrocarril al Pacífico
4	50 m este de la Castellana
5	Avenida 26 entre calles 13 y 15, Barrio La Cruz
6	200 m sur de la antigua Dos Pinos, Barrio Luján
7	50 m sur y 100 este del MINAE, Barrio Francisco Peralta
8	Detrás de la Iglesia Santa Teresita
9	Costado sur del Tribunal Supremo de Elecciones
10	75 m este del edificio del AYA
11	Frente a JAPDEVA
12	150 m oeste de la Iglesia de Barrio México
13	200 m sur del Parque Salvador, Barrio Pithaya
14	Costado este de la NUMAR

Para cada uno de los puntos se calculó el promedio de 6 ó 4 réplicas de los tubos pasivos, expuestos durante 22 días, en los contenedores para el monitoreo 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.



Amarillo: Año 2005-2006 Anaranjado: Año 2003-2004

**Figura 10. Variación de las concentraciones promedio mensuales de Dióxido de Nitrógeno obtenidas en los años 2004 y 2006 para los puntos de muestreo ubicados en la Ciudad de San José.**

De acuerdo con la figura 10, se puede apreciar que la concentración de Dióxido de Nitrógeno sobrepasa el valor criterio mensual establecido por la Organización Mundial de Salud de 40 ug/m<sup>3</sup> para cinco de los puntos a saber: Hospital San Juan de Dios, Catedral Metropolitana, Avenida 10 cerca de Bomba La Castellana, Edificio del Ay A sobre el Paseo de los Estudiantes y el Edificio de la Numar en Barrio Cuba.

