

# CALIDAD DEL AIRE EN EL GRAN AREA METROPOLITANA DE COSTA RICA



3

Informe de estado y  
tendencias: Año 2010

# Presentación

---

El deterioro de la calidad del aire generado por el incremento constante en las emisiones, provenientes tanto de fuentes fijas como móviles, es una amenaza aguda, acumulativa y crónica para la salud humana y el ambiente. Las personas están expuestas a contaminantes del aire y esta exposición puede detonar o agravar afecciones respiratorias, cardíacas y otras.

Con el fin de minimizar el riesgo que representa la contaminación del aire para la salud humana, los países deben establecer instrumentos legales y mecanismos de coordinación que permitan mejorar las acciones de vigilancia, control y prevención de la contaminación atmosférica. De esta forma, la gestión de calidad del aire en los países debe apoyarse en una serie fundamental de instrumentos que permitan evaluar, de forma eficiente y confiable, el estado de situación y evolución de los niveles de concentración de contaminantes criterio del aire. Dicha evaluación debe realizarse utilizando metodologías confiables que garanticen tanto la representatividad, como la veracidad de la información generada.

Los resultados obtenidos de las actividades de monitoreo de la calidad del aire, podrán ser utilizados en otros para:

- verificar el grado de cumplimiento de las normas nacionales de calidad del aire,
- especificar tipos y fuentes emisoras,
- validar los datos generados a partir de la modelación de los inventarios de emisiones,
- evaluar la eficacia de las medidas de control de la contaminación atmosférica desarrolladas de acuerdo a los lineamientos de los programas de gestión de calidad del aire,
- llevar a cabo estudios epidemiológicos que relacionen los efectos de las concentraciones de los contaminantes con daños en la salud y los costos derivados de la atención de los mismos.

Conscientes de que el Gran Área Metropolitana de Costa Rica no escapa a los problemas de deterioro de calidad del aire que sufren la mayoría de centros urbanos, el Ministerio de Salud, el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes, la Municipalidad de San José y la Universidad Nacional, han conformado una comisión de trabajo interinstitucional cuyo objetivo primordial es el de coordinar y potenciar los esfuerzos ejecutados en el país, en materia de gestión de

calidad del aire. Como parte de los productos generados en el marco de este programa, tenemos el gusto de presentar este informe del estado y las tendencias de la contaminación atmosférica en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica durante el año 2010, un documento que presenta un panorama general y comprensible de ésta problemática ambiental, que para esta edición incluye datos de nuevas estaciones de monitoreo de partículas  $PM_{10}$  así como la incorporación de nuevos contaminantes tales como  $PM_{2,5}$  nunca antes medido en el país. Su publicación nos permitirá no solamente ofrecer información oportuna y puntual sobre la calidad del aire en la región, sino también potenciar el desarrollo de todas las actividades relacionadas con la gestión de calidad del aire en esta región del país y tendencias de los niveles de los contaminantes criterio.

Dr. Jorge Herrera Murillo  
Universidad Nacional

# Calidad del Aire en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica

## 3 Informe de estado y tendencias: Año 2010

Ing. René Castro Salazar  
Ministro de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones

Dra. Daisy Corrales Díaz  
Ministra de Salud

Ing. Francisco Jiménez Reyes  
Ministro de Obras Públicas y Transportes

Ing. Johnny Araya Monge  
Alcalde Municipalidad de San José

Licda. Sandra León Coto  
Rectora Universidad Nacional

Elaborado por el Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, con la colaboración de:

Dr. Jorge Herrera Murillo  
Licda. Susana Rodríguez Román  
Lic. José Félix Rojas Marín  
Lic. Sebastián Miranda Brenes

# 1. Contaminantes Monitoreados

## 1.1. Partículas $PM_{10}$ y $PM_{2,5}$

### 1.1.1. Descripción:

Las partículas suspendidas son una mezcla compleja de componentes con diversas características químicas y físicas. Esta complejidad junto con la potencialidad que tienen para causar daños varía con el tamaño, composición, fuentes y características físicas. Las partículas se presentan en el aire ambiente en una gran variedad de formas, tamaños, origen y composición. Las partículas más grandes pueden permanecer en suspensión algunos minutos y recorrer distancias cortas, mientras que las más pequeñas permanecen en suspensión por períodos de días hasta semanas y pueden recorrer grandes distancias.

Las partículas pueden ser emitidas directamente por las fuentes de emisión o producirse de la transformación de gases y vapores en el aire ambiente. Las partículas originadas por el polvo de suelo, las generadas por los procesos de trituración y las emisiones en el humo de los escapes, se conocen como partículas primarias. Las partículas producidas por transformaciones químicas en la atmósfera se conocen como partículas secundarias (SMA, 2010).

La inhalación de las partículas suspendidas puede provocar diferentes daños en la salud de la población expuesta. Varios estudios epidemiológicos asocian a las partículas menores a 10 micrómetros ( $PM_{10}$ ) y menores a 2,5 micrómetros ( $PM_{2,5}$ ) con daños que incluyen la mortalidad prematura, problemas respiratorios crónicos, visitas a salas de emergencias y admisiones hospitalarias, agravación del asma, síntomas respiratorios agudos y una disminución en la función pulmonar. Al igual que en el caso de otros contaminantes criterio, los grupos más afectados son los adultos mayores, los niños y las personas con enfermedades previas. Los adultos mayores son más sensibles a los daños con las partículas por que sus reservas fisiológicas han disminuido con la edad y tienen una mayor incidencia de condiciones cardiorespiratorias, mientras que en los niños el sistema respiratorio se encuentra en desarrollo y permanecen más tiempo en exteriores. Los individuos con problemas respiratorios, cardíacos y los asmáticos son más sensibles a los daños por partículas. Las partículas más pequeñas representan un mayor riesgo para la población, ya que su tamaño permite que penetren más fácilmente hasta las regiones

profundas del tracto respiratorio y contienen una gran proporción de metales tóxicos y compuestos orgánicos de gran toxicidad.

Una gran cantidad de estudios han demostrado la asociación entre la morbilidad y la mortalidad diaria y la contaminación atmosférica por partículas suspendidas, incluyendo exacerbaciones de asma, incremento en los síntomas respiratorios y cardíacos, decremento en la función pulmonar, incremento en el uso de medicamentos e incremento en la admisión hospitalaria. Sintomatología como tos crónica, bronquitis y otras enfermedades pulmonares podría estar asociada al incremento de los niveles de partículas suspendidas y muy especialmente de las partículas menores a  $2,5 \mu\text{m}$  (Cortés, 2002). Múltiples estudios realizados en Europa (29 ciudades) y en los Estados Unidos (20 ciudades) reportaron efectos de mortalidad a corto plazo de 0,62 y 0,46% respectivamente, por exposición a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como media de 24 horas (Organización Mundial de la Salud, 2006).

### **1.1.2 Metodología de muestreo:**

Para el muestreo de partículas, la Red de Monitoreo Atmosférico del Gran Área Metropolitana de Costa Rica cuenta, a partir del año 2010, con catorce sitios para  $\text{PM}_{10}$  y cuatro sitios de  $\text{PM}_{2,5}$  de acuerdo con la información contenida en la tabla 1.

Para la colección de las muestras de partículas  $\text{PM}_{10}$  se utilizan muestreadores de aire de alto volumen marca Thermo Andersen modelo MFC. Una vez cada tres muestreos, se realizó una curva de calibración del flujo de cada uno de los muestreadores 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. Para cada uno de los muestreos se tomaron registros de las condiciones de temperatura y presión atmosférica, para posteriormente realizar las correcciones de volumen a 1 atm de presión y  $25^\circ\text{C}$  de temperatura.

En la colección de las partículas, se utilizaron filtros de fibra de vidrio marca Whatman CAT No 1829-932 dos veces por semana y filtros de cuarzo Whatman CAT 1851-865, para el análisis posterior de metales en al menos una ocasión a la semana. Para el análisis de iones inorgánicos se utilizaron tanto las muestras colectadas en filtros de fibra de vidrio como en cuarzo para un total de tres muestras semanales, mientras que para el análisis de metales únicamente se emplearon los filtros de cuarzo (una muestra semanal).

**Tabla 1. Sitios de monitoreo para partículas suspendidas en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica.**

<b>Código</b>	<b>Cantón</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Técnica de muestreo</b>
SJ-01	San José	Distrito: Catedral, instalaciones de la Catedral Metropolitana	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
SJ-02	San José	Distrito: Catedral, instalaciones del Ministerio de Obras Públicas y Transportes	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
SJ-03	San José	Distrito: La Uruca, instalaciones de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
SJ-04	San José	Distrito: Zapote, oficinas del Registro Nacional	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
SJ-05	San José	Distrito: Hatillo, instalaciones del Centro de Acopio Municipal	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
HE-01	Heredia	Distrito: Heredia, edificio de la Rectoría de la Universidad Nacional	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
BE-01	Belén	Distrito: La Ribera, Centro Comercial La Ribera	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
BE-02	Belén	Distrito: La Asunción, Oficinas de la Empresa Intermodal	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana

Código	Cantón	Ubicación	Contaminante	Técnica de muestreo
SA-01	Santa Ana	Distrito: Pozos, Oficinas de la compañía MATRA	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
AL-01	Alajuela	Distrito: Central, Instalaciones de la Universidad Técnica Nacional	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
SD-01	Santo Domingo	Distrito: Santo Domingo, Oficinas del Área Rectora del Ministerio de Salud	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
MO-01	Moravia	Distrito: San Vicente, Instalaciones de la empresa EATON	PM <sub>10</sub> , PM <sub>2,5</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
CA-01	Cartago	Distrito: Llano Grande, Instalaciones de la Zona Franca	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
ES-01	Escazú	Distrito: Escazú, Oficina de la Municipalidad de Escazú	PM <sub>10</sub>	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana

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.

Para el muestreo de PM<sub>2,5</sub> se utilizaron equipos manuales y portátiles (Minivol, marca AirMetrics) autónomos con batería que operan a un flujo de 5 litros por minuto. La separación de la fracción de PM<sub>2,5</sub> se realiza en la entrada de la muestra mediante un cabezal con dos impactores, uno (superior) que separa las partículas PM<sub>10</sub> de las totales y un segundo impactor que separa finalmente las partículas PM<sub>2,5</sub> de las PM<sub>10</sub>. La duración de cada muestreo fue de 24 ± 2 horas. Se utilizaron filtros de cuarzo (análisis de metales e



iones solubles) y de teflón. Las muestras colectadas en filtros de teflón se analizaron mediante gravimetría para determinar la concentración de las partículas  $PM_{2.5}$  suspendidas en aire ambiente. El pesaje de los filtros se realizó empleando una balanza semimicroanalítica (Mettler, con una resolución mínima de 1.0  $\mu\text{g}$ , incertidumbre de  $\pm 0.005$  mg, precisión de 1.0  $\mu\text{g}$  y exactitud de 0.0012%). El método y procedimiento en laboratorio incluye: (1) acondicionamiento durante 24 horas antes y después del monitoreo a una temperatura de 22°C ( $\pm 3^\circ\text{C}$ ) y una humedad relativa de 40% ( $\pm 5\%$ ); (2) uso de pulsera antiestática, así como barras de Polonio 210 para quitar las cargas electrostáticas; (3) calibración del equipo (que es efectuada cada año por un laboratorio acreditado), verificación con pesas calibradas E1 y verificación con pesas calibradas de trabajo en cada pesaje (diario). Se usa el 5% de los filtros como blancos de laboratorio.

### **1.1.3. Situación durante el año 2010:**

Al comparar los promedios anuales obtenidos para los sitios de monitoreo de partículas  $PM_{10}$  durante el año 2010 (Tabla 2), se puede determinar que todos los sitios cumplen tanto la norma anual (50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) como la norma de 24 horas (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), reportadas en el decreto 30221-SALUD, con excepción de HE-01 y BE-02 donde se supera la norma anual. Las concentraciones obtenidas en estos dos sitios pueden deberse a la influencia de las emisiones generadas por el alto flujo vehicular predominante en ambos sitios de monitoreo, a las condiciones de las calles y ubicación de múltiples paradas de autobuses. En forma adicional, en cuatro sitios de muestreo (HE-01, SJ-03, BE-02 y MO-01) se incluyeron a partir del año 2010, muestreadores para partículas  $PM_{2.5}$ . Al igual que en el caso de las  $PM_{10}$ , existe evidencia importante sobre la asociación entre el aumento en la morbi-mortalidad y el crecimiento en la concentración de  $PM_{2.5}$ . Para este contaminante no se ha identificado un umbral por debajo del cual no se presenten daños a la salud, esto ha motivado que los límites para la protección de la salud pública sean cada vez más bajos. Las concentraciones límite propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) son considerablemente más bajas que las vigentes en países latinoamericanos como México, tanto para el indicador de exposición aguda como el de exposición crónica. En la tabla 3, se presentan los valores promedio anual de concentración de partículas  $PM_{2.5}$  obtenido para los sitios de monitoreo. Cabe mencionar que la comparación se realiza con normativa internacional ya que el país no cuenta con norma para este contaminante dentro del decreto 30221-S. Los incumplimientos a la normativa de la USEPA,

Tabla 2. Promedios anuales, valores máximos y mínimos ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para partículas  $\text{PM}_{10}$  registrados en los sitios de monitoreo ubicados en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2010.

	SAN JOSE							HEREDIA				ALAJUELA	CARTAGO
	SJ-01	SJ-03	SJ-04	SJ-05	SA-01	MO-01	ES-01	SD-01	HE-01	BE-01	BE-02	AL-01	CA-01
Muestras válidas	53	85	88	60	51	69	91	79	100	103	93	69	61
Promedio	28	37	29	35	26	20	22	22	56	34	52	25	28
Máximo	43	65	47	84	46	37	59	10	114	73	107	47	60
Mínimo	14	22	13	12	12	6	7	97	10	10	12	15	12

Tabla 3. Promedios anuales, valores máximos y mínimos ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para partículas  $\text{PM}_{2.5}$  registrados en los sitios de monitoreo ubicados en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2010.

	BE-02	HE-01	SJ-03	MO-01
N	82	75	79	90
Promedio	36	35	27	13
Máximo	62	66	58	26
Mínimo	14	6	14	6

en el caso de los sitios de muestreo SJ-03, HE-01 y BE-02 se dan tanto para el umbral de 24 horas (USEPA:  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) como para el valor anual (USEPA:  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Del total de días muestreados, el 42%, 55% y 51% presentan incumplimiento al valor límite reportado por la USEPA para muestreos de 24 horas, en SJ-03, HE-01 y BE-02 respectivamente.

Se utilizó el análisis de componentes principales para estudiar las variaciones espaciales de la concentración de partículas  $\text{PM}_{10}$  en los 13 sitios de muestreo ubicados en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica. Janssen et al (1989) han utilizado esta herramienta estadística, con anterioridad, para distinguir 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. La tabla 4 resume los resultados del análisis estadístico para los datos de partículas  $\text{PM}_{10}$  obtenidos durante el año 2010 en los sitios de muestreo.

El porcentaje de la varianza total ( $\text{Varianza} = \Sigma (X_{\text{modelo}} - X_{\text{medida}})^2$ ) explicado por el primer factor corresponde a un 18,9% e incluye los siguientes sitios de monitoreo: SJ-01, SJ-03, SJ-04, SJ-05, HE-01, BE-02 y SA-01, los cuales se caracterizan por estar ubicados en zonas comerciales o residenciales con vías de alto flujo vehicular, lo anterior puede evidenciar el aporte de las fuentes móviles a las concentraciones de partículas en estos sitios. El segundo componente, con un porcentaje de varianza explicado de 16,8% muestra valores negativos para los sitios ubicados al sureste del Gran Área Metropolitana y positivos para aquellos ubicados en el sector noroeste, lo que hace presumir un gradiente sur-norte, coincidente con el patrón de vientos predominante en la zona de estudio. Por último, el tercer factor (15,4%) incluye a sitios de monitoreo como BE-01, BE-02, SJ-03, SJ-04 y CA-01 que tienen como factor común el estar localizados en zonas donde predominan las actividades industriales como patrón de uso de suelo, por lo que se puede inferir la importancia del aporte de las emisiones provenientes de fuentes fijas.

Para los sitios de muestreo, según se puede observar en la tabla 5, los iones predominantes resultaron ser el  $\text{SO}_4^{-2}$  y el  $\text{NO}_3^-$  seguidos del  $\text{Cl}^-$  y  $\text{PO}_4^{-3}$ . En el caso de los metales, el Na, Al y Fe, mostraron las concentraciones mayores en las partículas  $\text{PM}_{10}$ , mientras que el Ni y el V fueron las especies menos abundantes.

La relación de masa entre  $\text{NO}_3^- / \text{SO}_4^{-2}$  ha sido utilizada como un indicador de la importancia relativa de fuentes móviles versus fuentes estacionarias en el origen tanto del N como del S presente en la atmósfera (Arimoto et al., 1996; Yao et al., 2002). Arimoto

et al. (1996) describen que un valor de la relación  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{-2}$  mayor a uno, evidencia la predominancia de las fuentes móviles sobre las estacionarias. Dichos autores, estiman

**Tabla 4. Resultados del análisis de componentes principales utilizando los valores de  $\text{PM}_{10}$  registrados para los 14 sitios ubicados en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 2010.**

Sitio de muestreo	Factor 1	Factor 2	Factor 3
SJ-01	<b>0,577</b>	0,068	0,230
SJ-03	<b>0,516</b>	-0,282	<b>0,670</b>
SJ-04	<b>0,491</b>	-0,146	<b>0,654</b>
SJ-05	<b>0,805</b>	0,099	-0,240
HE-01	<b>0,628</b>	0,212	0,423
BE-01	0,212	<b>0,723</b>	<b>0,594</b>
BE-02	<b>0,689</b>	<b>0,594</b>	<b>0,766</b>
SA-01	<b>0,541</b>	<b>0,656</b>	0,451
AL-01	-0,299	<b>0,553</b>	0,487
SD-01	-0,218	-0,116	0,219
MO-01	0,142	0,234	-0,182
CA-01	-0,165	-0,429	<b>0,615</b>
ES-01	-0,011	<b>0,606</b>	0,195
<b>Porcentaje de varianza explicada</b>	<b>18,9</b>	<b>16,8</b>	<b>15,9</b>

que la relación de las emisiones de  $\text{NO}_x/\text{SO}_x$  para motores de diesel es de 8:1, 13:1 para motores de gasolina y 1:3 para sistemas de combustión que operan con búnker. Si se considera que el contenido de azufre en el búnker, que se expende en Costa Rica (combustible utilizado en las calderas industriales), es de 1,0% es razonable utilizar el  $\text{SO}_4^{-2}$  como un indicador de emisiones de fuentes fijas y el  $\text{NO}_3^-$  para fuentes móviles. Para los sitios de muestreo se presentaron relaciones de  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{-2}$ , presente en las partículas colectadas, comprendidas entre 0,20 y 0,35. Lo anterior se puede deber a la disminución de las emisiones de  $\text{NO}_x$  como producto del programa de revisión técnica

Tabla 5. Concentración promedio anual de PM<sub>10</sub> y sus principales constituyentes químicos obtenidos en los sitios de muestreo ubicados en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, año 2010 (La estación SJ-02 no operó durante 2010 por problemas técnicos)

Concentración	SAN JOSE							HEREDIA					
	SJ-01	SJ-03	SJ-04	SJ-05	SA-01	MO-01	ES-01	HE-01	BE-01	BE-02	SD-01	AL-01	CA-01
PM <sub>10</sub> (µgm <sup>-3</sup> )	28 ± 7	37 ± 9	29 ± 8	35 ± 17	26 ± 11	20 ± 7	22 ± 6	56 ± 15	34 ± 10	52 ± 18	22 ± 9	25 ± 13	28 ± 10
<b>Iones Solubles</b>													
<b>(µgm<sup>-3</sup>)</b>													
F <sup>-</sup>	0,06 ± 0,01	0,08 ± 0,07	0,07 ± 0,02	0,07 ± 0,03	0,06 ± 0,02	0,08 ± 0,04	0,07 ± 0,02	0,08 ± 0,02	0,06 ± 0,02	0,07 ± 0,03	0,08 ± 0,04	0,06 ± 0,02	0,09 ± 0,05
Cl <sup>-</sup>	0,89 ± 0,40	1,17 ± 0,86	1,38 ± 0,33	1,01 ± 0,62	1,04 ± 0,51	1,08 ± 0,65	1,06 ± 0,51	0,98 ± 0,60	0,98 ± 0,58	1,01 ± 0,62	1,08 ± 0,65	1,10 ± 0,50	1,39 ± 0,78
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1,11 ± 0,38	0,86 ± 0,34	0,98 ± 0,30	1,02 ± 0,36	1,08 ± 0,44	0,92 ± 0,32	0,93 ± 0,35	1,13 ± 0,42	1,01 ± 0,32	1,02 ± 0,36	0,92 ± 0,32	0,94 ± 0,32	0,79 ± 0,44
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	0,76 ± 0,58	0,67 ± 0,55	0,69 ± 0,33	0,41 ± 0,17	0,42 ± 0,35	0,71 ± 0,57	0,67 ± 0,19	0,54 ± 0,17	0,35 ± 0,21	0,41 ± 0,17	0,71 ± 0,57	0,78 ± 0,64	0,88 ± 0,31
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	3,16 ± 1,66	3,23 ± 1,68	4,04 ± 1,12	3,69 ± 1,80	3,89 ± 2,07	3,45 ± 2,17	3,39 ± 1,63	3,87 ± 1,65	3,52 ± 1,91	3,69 ± 1,80	3,45 ± 2,14	3,98 ± 2,25	3,94 ± 2,42
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,20 ± 0,04	0,20 ± 0,06	0,27 ± 0,07	0,21 ± 0,05	0,26 ± 0,09	0,20 ± 0,13	0,17 ± 0,08	0,27 ± 0,08	0,18 ± 0,07	0,21 ± 0,05	0,26 ± 0,07	0,20 ± 0,05	0,24 ± 0,11
<b>Metales</b>													
<b>(ngm<sup>-3</sup>)</b>													
V	2,4 ± 0,9	3,7 ± 1,6	2,0 ± 0,5	4,1 ± 0,8	6,3 ± 2,7	1,2 ± 0,6	1,8 ± 0,9	2,8 ± 1,2	5,9 ± 3,0	6,4 ± 3,6	1,6 ± 0,9	8,8 ± 5,6	4,6 ± 0,7
Pb	2,5 ± 1,0	11,8 ± 5,3	14,5 ± 3,5	9,3 ± 2,8	8,7 ± 3,2	8,6 ± 3,0	6,8 ± 4,0	11,5 ± 3,9	11,7 ± 6,7	11,2 ± 6,8	4,3 ± 2,7	10,6 ± 4,7	5,4 ± 1,4
Cr	9,9 ± 2,4	11,5 ± 4,5	9,8 ± 2,7	8,7 ± 4,4	8,2 ± 3,1	5,7 ± 1,6	5,6 ± 1,4	4,9 ± 1,3	7,4 ± 2,7	8,7 ± 4,4	5,5 ± 1,2	9,1 ± 4,2	7,5 ± 1,2
Cu	21 ± 10	47 ± 28	50 ± 41	46 ± 39	98 ± 65	86 ± 38	50 ± 27	84 ± 54	140 ± 80	146 ± 65	16 ± 4	57 ± 41	87 ± 26
Ni	2,0 ± 0,9	4,6 ± 1,4	5,3 ± 4,2	4,1 ± 3,2	4,7 ± 3,3	3,4 ± 2,3	1,8 ± 0,9	2,1 ± 0,8	6,7 ± 4,0	7,0 ± 3,6	3,0 ± 2,0	4,2 ± 1,7	4,1 ± 2,7

Concentración	SAN JOSE						HEREDIA						
	SJ-01	SJ-03	SJ-04	SJ-05	SA-01	MO-01	ES-01	HE-01	BE-01	BE-02	SD-01	AL-01	CA-01
Mn	60 ± 20	58 ± 32	63 ± 22	53 ± 37	63 ± 48	84 ± 39	116 ± 55	139 ± 71	121 ± 32	136 ± 24	49 ± 45	57 ± 22	46 ± 16
Al	321 ± 98	407 ± 106	472 ± 118	432 ± 105	501 ± 137	305 ± 117	332 ± 137	406 ± 87	472 ± 126	673 ± 277	342 ± 157	598 ± 192	502 ± 188
Fe	202 ± 93	361 ± 150	252 ± 115	436 ± 149	249 ± 56	189 ± 58	182 ± 93	431 ± 203	397 ± 166	553 ± 247	155 ± 73	216 ± 73	251 ± 133
Ca	252 ± 88	283 ± 76	380 ± 172	277 ± 90	114 ± 73	151 ± 74	138 ± 60	179 ± 107	114 ± 73	367 ± 223	197 ± 58	173 ± 73	310 ± 141
Mg	208 ± 34	139 ± 48	128 ± 45	192 ± 70	179 ± 46	112 ± 42	98 ± 40	102 ± 52	100 ± 41	154 ± 68	104 ± 40	141 ± 53	151 ± 71
Na	1143 ± 461	1440 ± 425	1228 ± 473	1627 ± 246	1140 ± 305	1191 ± 805	1155 ± 440	1306 ± 567	1302 ± 580	1394 ± 376	1165 ± 482	1492 ± 712	1508 ± 502
K	180 ± 27	236 ± 104	203 ± 58	237 ± 74	212 ± 128	123 ± 39	164 ± 39	124 ± 45	216 ± 112	231 ± 102	167 ± 60	180 ± 52	163 ± 49

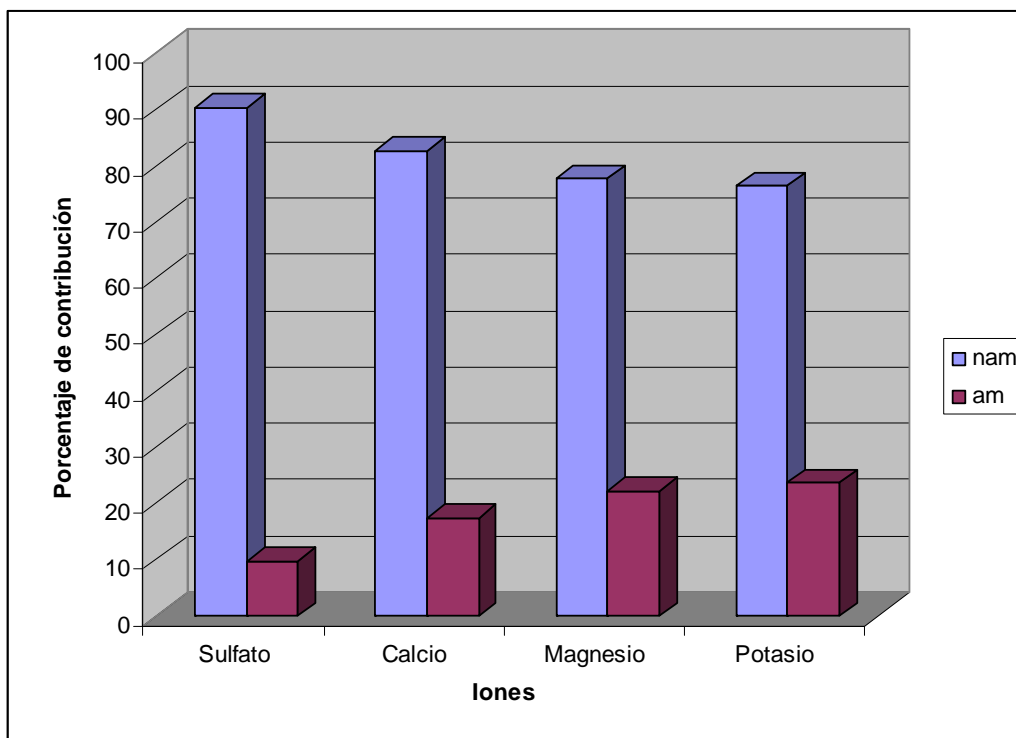
El valor reportado con el signo  $\pm$  corresponde a la desviación estándar de los datos

vehicular del país así como al programa de mejoramiento de la calidad de los combustibles ejecutado por la Refinadora Costarricense de Petróleo.

El patrón de vientos predominantes en el Área Metropolitana de Costa Rica favorece el transporte de masas de aire desde los océanos hasta la meseta central, debido a lo anterior es sumamente importante estimar el aporte del aerosol marino a la composición química de las partículas. Para ello, es necesario calcular la fracción de los distintos componentes inorgánicos influenciados por este. Especies como  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  tienen fuentes tanto marinas como continentales. Basado en la relación de masa de estos con respecto al  $\text{Na}^+$ , el componente debido al aerosol marino se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Duce et al., 1983):

$$[X]_{nam} = M_x - [X/Na]_{am} M_{Na} \quad (1)$$

donde la expresión  $[X/Na]_{am}$  denota la relación de masa del ion X con respecto al  $\text{Na}^+$  en el agua de mar,  $M_x$  y  $M_{Na}$  la concentración del ion X y del  $\text{Na}^+$  en las partículas  $\text{PM}_{10}$ . De acuerdo con Berg y Winchester (1978), la relación de masa de las siguientes especies:  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Ca}^{2+}$  con respecto al  $\text{Na}^+$  en agua de mar es de 0,25, 0,037, 0,12 y 0,038 respectivamente. La diferencia entre la concentración del ion presente en las partículas y el componente debido a la contribución marina, corresponde a la fracción originada por fuentes diferentes al aerosol marino  $[X]_{nam}$ . La figura 1 muestra la distribución, tanto de la fracción debida al aerosol marino como la atribuida a otras fuentes. Si se analiza el caso del  $\text{SO}_4^{-2}$ , se puede apreciar que aproximadamente el 90% de la concentración másica de este ion tiene un origen distinto al aerosol marino; en el caso del  $\text{K}^+$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  esta fracción representa como mínimo el 76 y 83%, respectivamente en los diferentes sitios de muestreo. Sobre el continente, la fracción de  $\text{SO}_4^{-2}$  que no proviene del aerosol marino constituye un trazador de actividades antropogénicas y de quema de combustibles fósiles, el  $K_{nam}$  se origina mayoritariamente por quema de biomasa mientras que el  $Ca_{nam}$  tiene un origen predominantemente cristal.



**Figura 1. Contribución del aerosol marino a la composición química de las partículas colectadas en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2010.**

Las relaciones elementales en muestras de aerosoles pueden proporcionar información importante para entender su posible origen. De esta forma, los factores de enriquecimiento de los elementos presentes en esta matriz, con respecto a la concentración existente en el material crustal, se suelen calcular con el fin de identificar las posibles fuentes y la contribución de las emisiones antropogénicas a los niveles de metales en las partículas  $PM_{10}$  (Duce et al., 1975; Zoller et al., 1974). Si el valor del factor de enriquecimiento es cercano a la unidad, el elemento presenta un origen predominantemente crustal. Sin embargo, debido a las diferencias existentes entre la composición crustal en las distintas regiones del planeta, los valores de factor de enriquecimiento comprendidos entre 1-10, se consideran de origen natural.

Elementos como el Al, Si, Ti, Fe se usan comúnmente como elemento de referencia para el cálculo de los factores, debido a que son muy abundantes en el material crustal y no son significativamente afectados por la contaminación. En el presente estudio, para estimar dichos factores se utilizó como referencia el Fe y la concentración crustal continental superior se tomó de Taylor y McLennan (1985).

El factor de enriquecimiento de un elemento FE en una muestra de aerosol, se define como:

$$FE = (E/R)_{Aire} / (E/R)_{suelo} \quad (2)$$

donde R es el elemento de referencia.



Los valores de factores de enriquecimiento calculados a partir de los datos de concentración de metales, presentes en las partículas colectadas en el Área Metropolitana de Costa Rica, se muestran en la tabla 6 y siguen la siguiente secuencia: Cu > Pb > Mn > Ni > Cr > V > Al.

**Tabla 6. Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas en los sitios de muestreo de partículas PM<sub>10</sub> ubicados en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2010.**

Sitio de muestreo	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Mn	Al
SJ-01	6,7	43	7,4	125	9,4	20,8	0,5
SJ-03	5,4	51	8,1	143	10,5	27,5	0,7
SJ-04	7,2	77	8,8	158	8,4	22,6	0,8
SJ-05	8,1	83	7,9	167	7,7	25,5	0,6
BE-01	4,7	52	8,1	160	11,6	23,4	0,3
BE-02	5,5	63	8,6	189	12,9	31,6	0,4
HE-01	7,7	59	7,5	182	7,9	29,4	0,6
SD-01	4,8	38	5,5	67	4,5	11,9	0,2
MO-01	4,0	40	4,8	59	5,7	9,6	0,3
AL-01	7,3	69	6,8	167	7,9	30,1	0,8
CA-01	7,9	74	7,5	181	9,2	32,4	0,9
SA-01	5,9	76	5,1	128	7,4	25,3	0,4
ES-01	4,4	55	4,6	72	6,2	28,6	0,5

El Pb, Mn, Ni y Cu presentan valores de FE en el rango de 10-1000 lo que indica que la concentración de estos elementos en las partículas es enriquecida por fuentes que no son de origen crustal tales como: combustión de hidrocarburos fósiles, tráfico vehicular, emisiones de industrias metalmeccánicas, etc. Para el resto de los metales, los FE resultaron ser pequeños, situación que pudiera deberse a que la composición media de los suelos en Costa Rica fuese diferente a la media universal utilizada para el cálculo de los factores, por lo que no se puede descartar la contribución antropogénica.

## 1.2. Dióxido de Nitrógeno:

### 1.2.1. Descripción:

Los óxidos de nitrógeno incluyen varias especies que contienen oxígeno y nitrógeno, sin embargo, desde el punto de vista de la salud humana el dióxido de nitrógeno es el más importante. El dióxido de nitrógeno es un fuerte oxidante y reacciona fácilmente con el agua para formar ácido nítrico y óxido nítrico. Este contaminante se produce durante la combustión pero en menores cantidades que el monóxido de nitrógeno (óxido nítrico), la

mayor parte del dióxido de nitrógeno se genera por la oxidación del monóxido de nitrógeno en presencia de radicales orgánicos (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986). En la tropósfera, este contaminante juega un papel importante en la producción fotoquímica del ozono y su presencia regula las concentraciones de ozono durante el día.

Además de los efectos que produce en la salud, el dióxido de nitrógeno puede absorber parte de la radiación solar y junto con las partículas suspendidas es responsable de la disminución de la visibilidad, es precursor de la lluvia ácida y también juega un papel importante en el cambio climático global. Junto con el óxido nítrico es un regulador de las capacidades oxidativas en la tropósfera al controlar el desarrollo y destino de los radicales, incluyendo el radical hidroxilo.

La principal ruta de exposición en los seres humanos es durante la respiración. Una gran parte del dióxido de nitrógeno se remueve en la nasofaringe, sin embargo, durante la realización de ejercicio puede alcanzar regiones más bajas del sistema respiratorio.

Algunos estudios han demostrado que el dióxido de nitrógeno o algunos de sus derivados químicos, pueden permanecer dentro de los pulmones por períodos prolongados de tiempo. Se ha observado también la presencia de óxido nítrico y nitroso o sus sales en la sangre u orina después de una exposición al dióxido de nitrógeno. En varios estudios experimentales de toxicología humana de corta duración, se han observado efectos agudos tras la exposición a concentraciones de dióxido de nitrógeno mayores a  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.339 ppm) durante una hora. El nivel más bajo de exposición a dióxido de nitrógeno que ha mostrado un efecto directo en la función pulmonar de los asmáticos es de  $560 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (0.380 ppm), no obstante, los estudios realizados sobre la capacidad de respuesta bronquial en los asmáticos parecen indicar que disminuye con niveles superiores a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  equivalente a 0.136 ppm (Organización Mundial de la Salud, 2006).

### **1.2.2. Metodología de muestreo:**

Para el monitoreo de los niveles de  $\text{NO}_2$  en el Área Metropolitana de Costa Rica se seleccionaron un total de 35 puntos de muestreo distribuidos de acuerdo como se indica en la Tabla 7. Las muestras se colectan mensualmente desde el año 2004, 2005 y 2008 para San José, Heredia y Belén respectivamente.

**Tabla 7. Localización de los sitios de muestreo utilizados en el monitoreo de NO<sub>2</sub> en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica**

Sitio	Provincia	Cantón	Tipo de punto	Ubicación Exacta
1	San José	Central	Comercial	Hospital San Juan de Dios, Paseo Colón
2	San José	Central	Comercial	Frente al costado norte de la Catedral Metropolitana, Avenida Segunda
3	San José	Central	Comercial	150 m norte de la Antigua Estación del Ferrocarril al Pacífico
4	San José	Central	Comercial	50 m este de la Estación de Servicio La Castellana, Avenida 10
5	San José	Central	Residencial	Avenida 26, calles 13 y 15, Barrio La Cruz
6	San José	Central	Residencial	200 m sur de la antigua fábrica Dos Pinos, Barrio Luján
7	San José	Central	Residencial	50 m sur y 100 este del edificio del Ministerio de Ambiente y Energía, Barrio Francisco Peralta
8	San José	Central	Comercial	Iglesia Santa Teresita, Barrio Aranjuez
9	San José	Central	Comercial	Costado sur del Tribunal Supremo de Elecciones de Costa Rica
10	San José	Central	Comercial	75 m este del edificio del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
11	San José	Central	Comercial	Frente al edificio de la Junta Administradora de Puertos de la Vertiente Atlántica
12	San José	Central	Residencial	150 m oeste de la Iglesia de Barrio México
13	San José	Central	Residencial	200 m sur del Parque Salvador, Barrio Pithaya
14	San José	Central	Industrial	Costado este de las instalaciones de la industria NUMAR, Barrio Cuba
15	Heredia	Central	Comercial	Frente al Automercado, carretera a Barba
16	Heredia	Central	Comercial	Frente al edificio de registro, UNA
17	Heredia	Central	Comercial	Frente al Mall Paseo de las Flores
18	Heredia	Central	Comercial	Costado norte del Mercado Central de Heredia
19	Heredia	Central	Comercial	Frente al Palacio de los Deportes
20	Heredia	Central	Residencial	Costado sur Iglesia de Mercedes Norte
21	Heredia	Central	Residencial	Residencial La Lilliana

Sitio	Provincia	Cantón	Tipo de punto	Ubicación Exacta
22	Heredia	Central	Residencial	Campus Benjamín Núñez UNA
23	Heredia	Central	Industrial	Frente a DHL en la Aurora
24	Heredia	Central	Comercial	Frente al Hiper más en San Francisco
25	Heredia	Belén	Comercial	Frente al Hotel Ramada Herradura
26	Heredia	Belén	Industrial	Frente a la Plaza de la Asunción
27	Heredia	Belén	Residencial	Residencial Cariari
28	Heredia	Belén	Industrial	Frente a la empresa Kimberly Clark
29	Heredia	Belén	Comercial	Costado norte de la Firestone
30	Heredia	Belén	Residencial	Frente al Hotel Marriot
31	Heredia	Belén	Residencial	Frente a la Iglesia Católica de La Ribera
32	Heredia	Belén	Comercial	Frente a la entrada del Parque Recreativo Ojo de Agua
33	Heredia	Belén	Comercial	Costado norte del Palacio Municipal de Belén
34	Heredia	Belén	Residencial	Frente al Polideportivo de Belén
35	Heredia	Belén	Comercial	Cruce de Radial a Santa Ana

Las concentraciones de dióxido de nitrógeno se determinaron mediante muestreo pasivo, el cual se basa 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 uniformemente en su seno, así como de atravesar una membrana sólida que le presente una determinada capacidad de permeación.

El muestreo se realizó con colectores que contienen tubos con mallas de acero de 11 mm de diámetro (superficie de absorción) las cuales fueron previamente sumergidas en una disolución formada a partir de la mezcla de trietanolamina con acetona (relación 1:8) durante al menos 24 horas. Los contenedores de PVC (figura 2) se ubican en postes del tendido eléctrico a una altura no menor a los 3 m con respecto al nivel del suelo y se exponen en el sitio de muestreo por un plazo de 22 a 30 días para posteriormente ser trasladados al laboratorio para su análisis.



**Figura 2. Esquema del colector pasivo para la determinación de dióxido de nitrógeno**

### 1.2.3. Situación del año 2010:

En las tabla 8, 9 y 10 se presentan el promedio anual y la desviación estándar de las concentraciones de  $\text{NO}_2$  obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica durante el año 2010. Tal como se puede notar al menos seis sitios en San José, dos de Heredia y tres de Belén presentan valores mayores a  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , que corresponde a la norma anual establecida por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante. Es importante aclarar, que dichos sitios se encuentran localizados en los principales accesos a las ciudades, además de constituir unas de las vías con mayor flujo vehicular en dichos lugares.

**Tabla 8. Concentraciones promedio anuales de  $\text{NO}_2$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en los sitios de muestreo ubicados en el Cantón Central de San José, Costa Rica.**

Sitio de Muestreo	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010
1	46 (5)	48 (6)	51 (3)	56 (10)	55 (11)	48 (11)	59 (20)
2	43 (3)	45 (6)	44 (6)	47 (7)	41 (5)	44 (10)	50 (9)
3	30 (5)	36 (4)	28 (4)	31 (4)	29 (7)	28 (6)	37 (8)
4	41 (5)	45 (11)	43 (8)	51 (6)	47 (10)	44 (13)	51 (10)
5	26 (4)	31 (3)	25 (3)	27 (4)	25 (6)	25 (6)	31 (7)
6	26 (7)	30 (5)	24 (4)	26 (4)	24 (8)	22 (5)	31 (12)
7	27 (9)	31 (5)	27 (8)	27 (5)	23 (5)	25 (7)	29 (8)
8	25 (6)	30 (6)	23 (5)	26 (6)	27 (4)	24 (7)	31 (9)
9	22 (8)	43 (11)	21 (4)	24 (5)	27 (3)	24 (7)	38 (9)
10	33 (10)	42 (3)	39 (4)	40 (5)	44 (7)	39 (9)	40 (12)
11	34 (2)	36 (5)	31 (5)	35 (4)	34 (9)	34 (7)	35 (9)

Sitio de Muestreo	Año 2004	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010
12	28 (10)	33 (7)	27 (6)	32 (7)	28 (6)	28 (7)	33 (17)
13	24 (6)	32 (7)	26 (7)	29 (7)	31 (5)	32 (7)	41 (5)
14	33 (6)	45 (11)	37 (3)	40 (6)	41(5)	36 (8)	47 (18)

El dato colocado entre paréntesis representa la desviación estándar del promedio

**Tabla 9. Concentraciones promedio anuales de NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en los sitios de muestreo ubicados en el cantón central de Heredia, Costa Rica.**

Sitio de muestreo	Año 2005	Año 2006	Año 2007	Año 2008	Año 2009	Año 2010
15	30 (5)	21 (4)	28 (6)	25 (5)	31 (7)	38 (9)
16	32 (5)	32 (3)	43 (6)	53 (9)	55 (7)	61 (8)
17	26 (4)	17 (4)	21 (8)	24 (7)	27 (5)	35 (7)
18	70 (4)	57 (8)	61 (5)	68 (10)	64 (7)	72 (9)
19	32 (5)	28 (3)	32 (5)	28 (9)	30 (3)	34 (5)
20	25 (4)	18 (3)	24 (5)	23 (3)	27 (4)	30 (3)
21	17 (3)	13 (4)	15 (4)	14 (5)	16 (3)	18 (4)
22	28 (3)	22 (5)	27 (4)	25 (7)	29 (6)	35 (6)
23	31 (6)	27 (6)	27 (5)	22 (4)	27 (8)	31 (7)
24	32 (3)	27 (2)	30 (3)	25 (3)	28 (4)	30 (5)

El dato colocado entre paréntesis representa la desviación estándar del promedio

**Tabla 10. Concentraciones promedio anuales de NO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en los sitios de muestreo ubicados en el cantón de Belén, Costa Rica.**

Sitio de muestreo	Año 2008	Año 2009	Año 2010
25	41 (3)	37 (8)	35 (6)
26	33 (10)	41 (6)	44 (5)
27	17 (5)	18 (5)	19 (3)
28	23 (7)	26 (3)	28 (5)

29	35 (7)	25 (8)	33 (7)
30	26 (7)	36 (9)	30 (5)
31	27 (5)	26 (5)	19 (4)
32	29 (9)	17 (6)	29 (5)
33	36 (3)	41 (5)	42 (7)
34	21 (9)	18 (7)	22 (4)
35	42 (9)	44 (7)	47 (4)

**El dato colocado entre paréntesis representa la desviación estándar del promedio**

Para la mayoría de sitios de monitoreo se presentan incrementos anuales entre el 5 y el 10%, sin embargo se puede desprender que para cada sitio la influencia de fuentes locales determina el comportamiento de la variación anual de concentración de dióxido de nitrógeno.

## 2. Efectos de la contaminación del aire: Depositación Total.

### 2.1. Descripción:

El depósito atmosférico es el proceso mediante el cual las partículas y gases contaminantes del aire llegan a la superficie de la tierra. Si ocurre en presencia de precipitación pluvial (lluvia, llovizna, granizo, etc) se denomina depósito húmedo, si se deposita a través de procesos como la sedimentación, la impactación y la adsorción, se denomina depósito seco.

Para caracterizar la acidez de las precipitaciones se usa la escala de pH que indica la concentración de iones hidrógeno ( $H^+$ ) responsables de la acidez. En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5,60, esta acidez se debe al dióxido de carbono que se encuentra en la atmósfera y que reacciona con el agua para formar ácido carbónico. Cuando el depósito húmedo tiene una mayor acidez el valor de pH es menor a 5,60 y se considera como precipitación o lluvia ácida.

El incremento en la acidez del agua de lluvia se debe, principalmente, a reacciones químicas en la atmósfera de los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno emitidos durante la combustión, en presencia de agua. Los precursores de la lluvia ácida pueden viajar cientos de kilómetros desde las fuentes de emisión y provocar gran variedad de impactos en una amplia región geográfica (USEPA, 2010).

En ecosistemas terrestres y acuáticos, la lluvia ácida puede ocasionar la declinación de especies, no obstante, esto también depende del tiempo de exposición y del nivel de sensibilidad. En la vegetación puede causar daños directos como pérdidas de nutrientes foliares y necrosis en las hojas y tejidos reproductores, lo cual conduce al debilitamiento de la planta, pérdida de frutos y descenso de la productividad; sin embargo los efectos indirectos pueden ser mayores. La acidificación progresiva del suelo, origina la pérdida de cationes básicos y la acumulación de aluminio, inhibiendo la fijación de nitrógeno en leguminosas, la biodisponibilidad de fosfatos y el crecimiento de las raíces. Esto conduce a la defoliación, clorosis y debilitamiento generalizado de la planta, haciéndola vulnerable al ataque de plagas, enfermedades, sequías u otros contaminantes. La degradación del suelo, también se manifiesta en aguas superficiales y mantos freáticos a través de procesos de acidificación, eutrofización y acumulación de metales tóxicos como el aluminio, que ocasionan la muerte progresiva de organismos acuáticos (USEPA, 2010).



## 2.2. Metodología de muestreo:

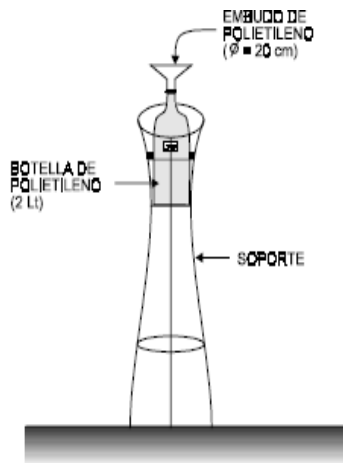
Se seleccionaron un total de 8 sitios de muestreo distribuidos en el Área Metropolitana de Costa Rica, los cuales se detallan en la tabla 11, para coleccionar muestras de depositación total durante la época lluviosa del año 2010.

**Tabla 11. Descripción de los sitios de muestreo para la colección de precipitación total en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2010**

Identificación del sitio de muestreo	Provincia	Cantón	Distrito	Descripción del sitio de muestreo
SJ-06	San José	Central	El Carmen	Biblioteca Nacional
SJ-07	San José	Central	Catedral	Ministerio de Seguridad Pública
SJ-08	San José	Central	Catedral	Sección de Parques, MSJ
SJ-09	San José	Central	Hospital	Municipalidad de San José
SJ-10	San José	Central	Mata Redonda	Instituto Costarricense de Electricidad
BE-01	Heredia	Belén	La Ribera	Centro Comercial La Ribera
BE-02	Heredia	Belén	La Asunción	Instalaciones de la Empresa Intermodal
HE-01	Heredia	Heredia	Central	Rectoría de la Universidad Nacional

En los sitios seleccionados, el muestreo de la depositación total se efectuó a través de un embudo de polietileno de 20 cm de diámetro, acoplado a una botella de polietileno de alta densidad de un litro mediante un orificio en la tapa, rellenando el espacio libre, entre el embudo y la tapa, con silicona caliente, para evitar la contaminación de la muestra (figura 3). El sistema de muestreo se encuentra sostenido por una base de metal de 1,25 m de altura, para prevenir la contaminación del sistema por salpicaduras. El colector utilizado cumple con las especificaciones recomendadas por Galloway et al. (1982) y permite captar la precipitación húmeda más algunos componentes introducidos al colector en forma seca.

Tanto el embudo como la botella de colección para la precipitación total, utilizada en el análisis de iones, se lavaron con agua desionizada, entre muestreos.



**Figura 3. Diagrama del colector de precipitación total**

La colección de las muestras durante la campaña de muestreo se efectuó en períodos de 24 horas, durante los meses de junio a noviembre del 2010. Los volúmenes colectados variaron desde 25 hasta 110 ml. El número total de muestras colectadas fue de 242.

Una vez colectadas las muestras fueron trasladadas al laboratorio, en donde, a la muestra se le determinó el volumen de agua colectado, pH, conductividad y la concentración de iones ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ).

### **2.3. Situación en el año 2010:**

En la tabla 12 se presentan los valores medios y desviación estándar, ambos ponderados por volumen de la conductividad e iones inorgánicos evaluados en las muestras de precipitación total colectadas en los 8 sitios de muestreo. A la hora de aplicar la prueba estadística de Kruskal Wallis se encontró que no hay diferencia significativa en las concentraciones de iones obtenidas en los sitios de muestreo, a un nivel de significancia del 5%. Las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las muestras de precipitación total obedecen el siguiente orden:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{H}^+ > \text{NO}_3^-$ . La concentración de  $\text{Cl}^-$  sugiere que se encuentra asociado directamente a una influencia marina. Con respecto al  $\text{F}^-$ , proviene de emisiones antropogénicas generadas principalmente por las industrias que llevan a cabo procesos de combustión con carbón de acuerdo a lo reportado por Zunckel et al. (2003).

Los valores promedio ponderados por volumen de pH más ácidos, se registran en los sitio SJ-10, SJ-09 y SJ-07, los cuales son sitios con gran flujo vehicular. Para estos sitios aproximadamente entre el 20-32% de los eventos presentan pH mayores a 5,6, que es el

pH del agua de nube en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico (Charlson and Rodhe, 1982).

**Tabla 12. Promedios ponderados por volumen para la concentración de iones inorgánicos ( $\mu\text{eq/l}$ ) y conductividad encontrados en las muestras de precipitación total colectadas en dos sitios ubicados en el Área Metropolitana de Costa Rica, junio-noviembre, 2010.**

Concentración ( $\mu\text{equivl}^{-1}$ )	Sitios de muestreo							
	SJ-06	SJ-07	SJ-08	SJ-09	SJ-10	BE-01	BE-02	HE-01
F <sup>-</sup>	6,5 ± 2,4	7,1 ± 3,3	6,7 ± 3,2	6,1 ± 2,9	5,9 ± 3,8	7,9 ± 4,6	7,1 ± 3,3	6,8 ± 3,9
Cl <sup>-</sup>	19 ± 8	17 ± 10	14 ± 3	21 ± 6	19 ± 6	14 ± 16	16 ± 14	17 ± 11
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	4,8 ± 0,7	5,3 ± 1,1	4,6 ± 0,9	6,1 ± 1,2	5,7 ± 0,9	5,1 ± 0,4	5,8 ± 1,6	5,5 ± 1,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	15,4 ± 7,2	16,7 ± 5,5	12,3 ± 6,1	15,7 ± 5,1	17,9 ± 3,2	12,8 ± 9,8	16,5 ± 6,4	14,7 ± 5,6
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	18 ± 12	15 ± 9	13 ± 7	20 ± 7	17 ± 7	23 ± 11	25 ± 13	22 ± 9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	39 ± 26	55 ± 18	42 ± 17	64 ± 21	58 ± 15	48 ± 25	62 ± 28	55 ± 21
H <sup>+</sup>	32 ± 15	41 ± 17	37 ± 12	42 ± 9	45 ± 10	37 ± 18	32 ± 19	40 ± 18
Conductividad ( $\mu\text{Scm}^{-1}$ )	15 ± 10	28 ± 12	25 ± 6	31 ± 11	28 ± 14	17 ± 9	24 ± 10	27 ± 12

La acidez de la precipitación total es controlada principalmente por los ácidos fuertes, como por ejemplo H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y HNO<sub>3</sub>. Considerando que los iones SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> son los principales componentes de acidificación de la precipitación, se puede estimar la Acidez Fraccional (AF) calculada como (Balasubramanian et al., 2001):

$$AF = \frac{[H^+]}{([nsm\ SO_4^{2-}] + [NO_3^-])}$$

Si esta relación es uno, se considera que la acidez generada por los ácidos fuertes no es neutralizada totalmente. La figura 4 muestra la variación de la acidez fraccional obtenida en las muestras de precipitación de cada uno de los sitios de muestreo. Es importante hacer notar que para aquellos sitios ubicados en el cantón de San José, aproximadamente solo el 36-57% de la acidez es neutralizada por constituyentes alcalinos mientras que el

caso de Belén varía de 30-60%. En forma adicional, se puede observar que para el año 2010 la fracción neutralizada resulto ser mucho menor para ambos sitios.

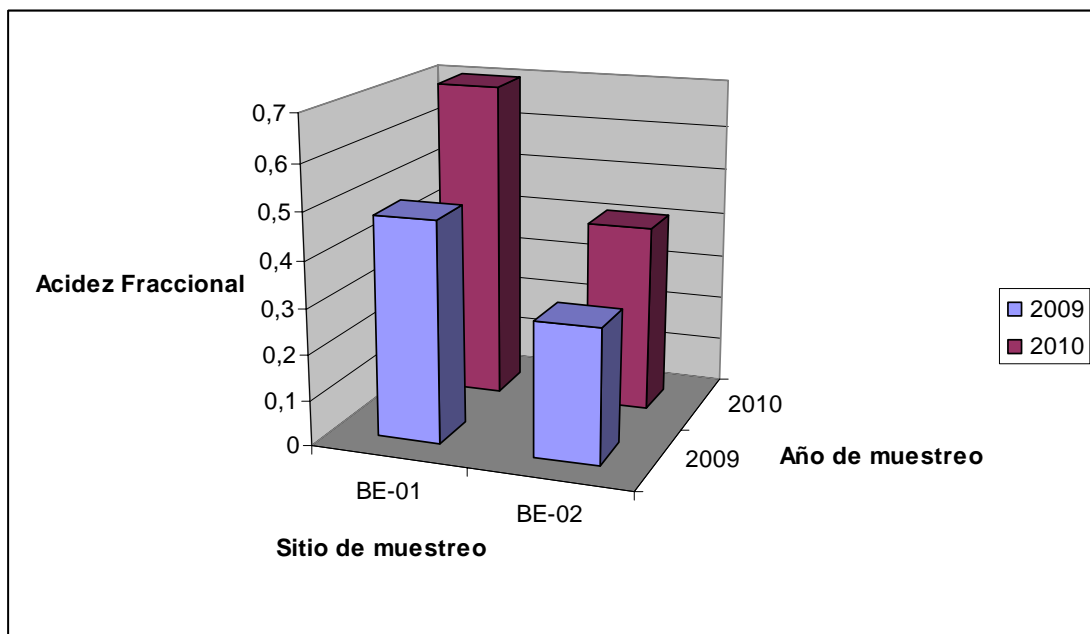
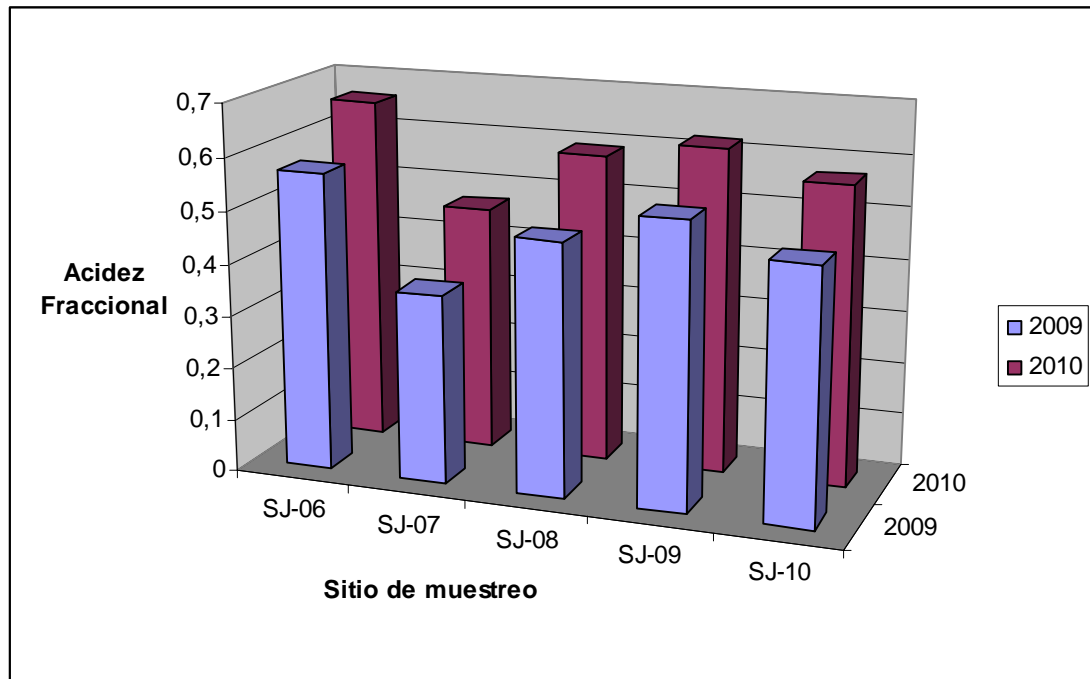


Figura 4. Variación de la acidez fraccional en las muestras de precipitación total colectada en los sitios de muestreo ubicados en el cantón de San José y Belén, años 2009-2010.

### 3. Análisis de Tendencias en la calidad del aire del Área Metropolitana de Costa Rica

#### 3.1. Partículas PM<sub>10</sub>:

La gestión de la calidad del aire tiene por objetivo el diseño y aplicación de estrategias y políticas públicas integrales, las cuales contribuyen a disminuir la concentración de contaminantes en el aire ambiente, en el mediano y largo plazo. La eficacia de las acciones desarrolladas se puede evaluar indirectamente, conociendo la tendencia y la disminución efectiva de las concentraciones ambientales durante su período de implementación.

Al analizar la tendencia registrada por los datos de partículas PM<sub>10</sub> para los sitios de monitoreo SJ-01 (2004-2010) y BE-01 (2008-2010) en los últimos años se puede observar que se presenta una tendencia al descenso en este sitio con una tasa anual que varía del 5-3% (Tabla 13).

**Tabla 13. Promedios Anuales de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) obtenidos para los sitios de muestreo SJ-01 y BE-01**

	SJ-01							BE-01		
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Promedio	46	41	33	44	29	27	28	41	38	34
Máximo	66	51	41	53	37	73	43	57	95	73
Mínimo	31	31	27	22	23	11	14	21	16	10
S	12	7	4	9	5	9	8	8	12	10

Este descenso puede ser atribuido a los esfuerzos realizados por el Ministerio de Ambiente y Energía y la Refinadora Costarricense de Petróleo por mejorar el contenido de azufre en los combustibles, especialmente el caso del diesel, en donde se pasó de 3500 a tan sólo 50 ppm. Además se debe destacar, que a partir del año 2005 se han introducido al mercado vehículos con motor de compresión diesel que poseen sistemas electrónicos de inyección que han mejorado la eficiencia de funcionamiento de los mismos.

Sin embargo de acuerdo con datos generados en el último inventario de emisiones de contaminantes criterio del Área Metropolitana de Costa Rica, el 97% de las emisiones de dióxido de azufre provienen de fuentes fijas, por lo que no se espera una reducción

adicional en las emisiones de este contaminante hasta tanto no se mejore la calidad del búnker utilizado en los procesos de combustión industriales. Es importante mencionar que existen importantes correlaciones entre el contenido de azufre de los combustibles y las emisiones de material particulado, especialmente en procesos de combustión.

Sin embargo, tal como se muestra en la tabla 14, el descenso en el contenido de azufre del combustible, no ha tenido una repercusión directa en el contenido de sulfato de las partículas, cuyo valor ha tendido a mantenerse constante en los últimos años. Lo anterior se puede deber al hecho de que las principales fuentes emisoras responsables de la generación de sulfato en partículas pudieran ser las emisiones de fuentes fijas, principalmente las originadas en procesos de combustión.

**Tabla 14. Promedio anuales de los principales constituyentes químicos de las muestras de partículas PM<sub>10</sub>, colectadas en los sitios SJ-01 (2004-2010) y BE-01 (2008-2010)**

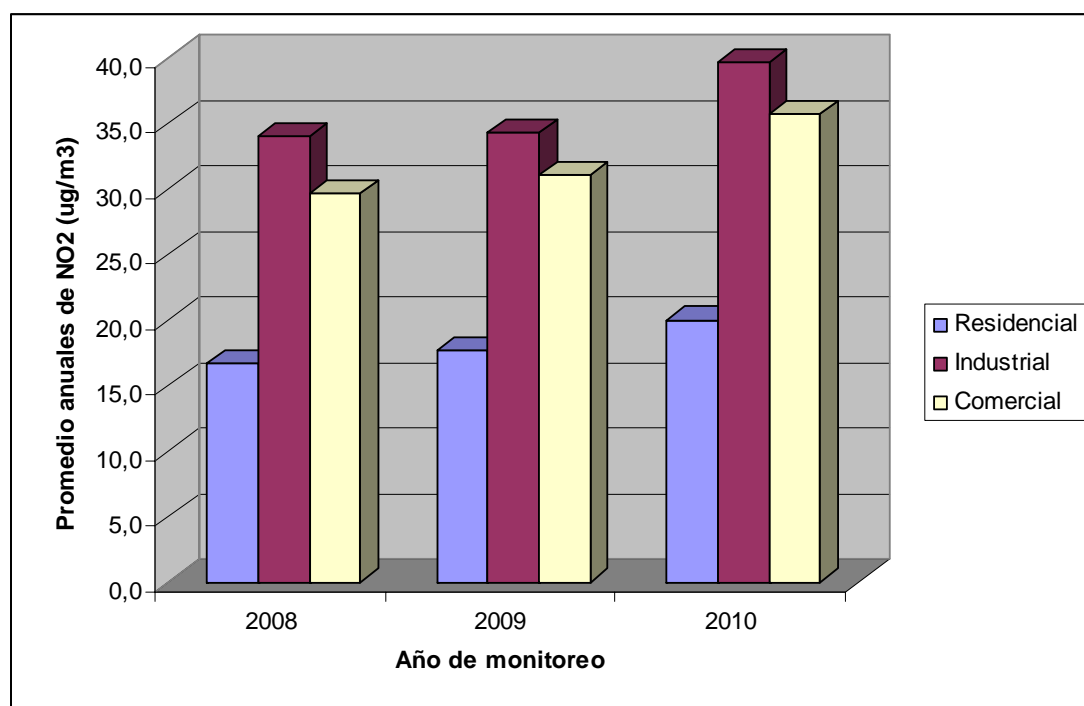
Contaminante	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
<b>SJ-01</b>							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> en PM <sub>10</sub>	2,73	4,16	2,86	3,12	3,05	3,01	3,16
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en PM <sub>10</sub>	0,86	1,06	1,04	0,88	0,90	0,95	1,11
<b>BE-01</b>							
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> en PM <sub>10</sub>				3,33	3,06	3,21	3,55
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> en PM <sub>10</sub>				0,29	0,52	0,85	1,01

En el caso de nitrato, es de esperarse el comportamiento observado al incrementar anualmente la flota vehicular, en una tasa cercana al 13% y por ende las emisiones generadas de óxidos de nitrógeno por las fuentes móviles.

### **3.2. Dióxido de Nitrógeno:**

Si se agrupan los datos mensuales de concentración de NO<sub>2</sub> de acuerdo a la naturaleza del sitio de muestreo (actividad local) para el caso del Área Metropolitana de Costa Rica, se puede observar que las tres categorías (comercial, industrial y residencial) presentan un comportamiento muy similar. Además es claro que los sectores comerciales e industriales presentan valores muy cercanos de concentración de dióxido de nitrógeno, con datos muy

cercanos o por encima del límite establecido por la Organización Mundial de la Salud (figura 5). Los valores elevados registrados en los sitios comerciales pueden ser atribuidos al alto flujo vehicular que se presentan en dichas zonas. Por otro lado el sector residencial se diferencia bastante de los otros sectores presentando valores significativamente menores. Posteriormente se hizo un análisis de promedios móviles para analizar la tendencia histórica que tienen los datos. A partir de este análisis se determinó que los tres sectores presentan una tendencia al alza en las concentraciones de dióxido de nitrógeno, solo que la tasa de crecimiento resulta ser 25 y 18% anual para el sector industrial y comercial y de tan sólo un 9% para el sector residencial.



**Figura 5. Comparación de niveles de NO<sub>2</sub> registrados en el Área Metropolitana de Costa Rica para el período 2008-2010, por tipo de sitio de muestreo.**

## 4. Conclusiones

Del presente informe de calidad del aire se desprenden las siguientes conclusiones:

1. Al menos dos de los catorce sitios de medición de  $PM_{10}$  existentes en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, presentan promedios anuales que superan ligeramente el límite de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  establecido en el decreto 30221-S, durante el año 2010.
2. Tres de los cuatro sitios de muestreo presentan concentraciones anuales de partículas  $PM_{2.5}$  superiores a las establecidas en las regulaciones de la OMS y la USEPA. Es importante ampliar la cobertura de los sitios de medición de  $PM_{2.5}$  con el fin de evaluar la situación en otros sectores del Área Metropolitana de Costa Rica.
3. Si bien es cierto la concentración de partículas  $PM_{10}$  en los sitios SJ-01 y BE-01 presentan una tendencia a la baja, con una tasa cercana al 3-5% anual, provocada, probablemente, por los esfuerzos realizados por RECOPE por reducir el contenido de azufre en los combustibles, los niveles de sulfato presente en las partículas no presentan el mismo comportamiento.
4. Algunos de los nuevos sitios de medición de  $PM_{10}$  revelan concentraciones que son superiores a los promedios registrados para sitios históricos como SJ-01, especialmente en zonas industriales y de alta densidad de población, aunque las mismas no superan la norma anual establecida en el decreto 30221-S.
5. La tendencia en la concentración de dióxido de nitrógeno presenta datos no muy alentadores, ya que los niveles en sitios de monitoreo residenciales comerciales e industriales crecen anualmente a tasas entre 9 y 25%, provocado por el incremento en la flota vehicular, que según datos del Primer Inventario de Emisiones de la GAM 2007, son las principales fuentes emisoras que contribuyen a las inmisiones de este contaminante. A partir de estos resultados es importante trabajar en un análisis profundo de los patrones de movilidad existentes en la región, con el fin de aumentar la velocidad promedio de circulación de vehículos y desfavorecer el uso de vehículos individuales sobre los colectivos.
6. Como parte del impacto de la contaminación del aire a los ecosistemas, se registran en el Área Metropolitana de Costa Rica un 28% de eventos de



precipitación con valores de pH por debajo de 5,60 (lluvia ácida). Esta situación podría estar causando impactos de la calidad de los suelos de la región y en las plantas y árboles presentes en los distintos ecosistemas predominantes en la GAM, adicionado al daño en estructuras metálicas. Es importante señalar que durante el año 2009 se presentaron solamente un 20% de eventos de precipitación con características de lluvia ácida.

7. Se debe fortalecer el monitoreo de la calidad del aire en la región, ya que el actual diseño no incluye todos los contaminantes criterio contenidos en el decreto 30221-S, cuyas emisiones son importantes de acuerdo con el último inventario de emisiones del Área Metropolitana de Costa Rica, 2007.
8. Los contaminantes monitoreados presentan en algunos casos concentraciones anuales mayores a las establecidas como valores límites para exposición crónica en la normativa nacional, lo que evidencia la urgente necesidad de establecer políticas de gestión tanto a nivel regional como local, con el fin de proteger la salud de los habitantes de la GAM
9. Actualizar los valores máximos permisibles de los contaminantes atmosféricos así como las metodologías de muestreo establecidas en el decreto 30221-S, utilizando para ellos los resultados y experiencia obtenidos con los informes de calidad del aire y los datos del inventario de emisiones del Gran Área Metropolitana de Costa Rica.

## 5. Referencias Bibliográficas

Arimoto, R., Duce, R.A., Savoie, D.L., Prospero, J.M., Talbot, R., Cullen, J.D., Tomza, U. Lewis, N.F., Ray, B.J., 1996. Relationships among aerosol constituents from Asia and the North Pacific during Pem-West A. *Journal of Geophysical Research* 101, 2011–2023.

Balasubramanian, R., Victor, T., Chun, N., 2001. Chemical and statistical analysis of precipitation in Singapore. *Water, Air and Soil Pollution* 130, 451–456.

Berg Jr., W.W., Winchester, J.W., 1978. Aerosol chemistry of marine atmosphere. In: Riley, J.P., Chester, R. (Eds.), *Chemical Oceanography 7*. Academic Press, London, pp. 173–231.

Charlson, R.O., Rodhe, H., 1982. Factors controlling the acidity of natural rainwater. *Nature* 295, 683–685.

Córtez, L.M. (2002). Efecto de la exposición a partículas PM10 y PM2,5 sobre la frecuencia y severidad de las exarcebaciones en los enfermos pulmonares obstructivos crónicos. CONACYT México (212270-5-29198)

Duce, R.A., Hoffman, G.L., Zoller, W.H., 1975. Atmospheric trace metals at remote northern and southern hemisphere sites: Pollution or natural. *Science* 187, 59–61.

Duce, R.A., Arimoto, R., Ray, B.J., Unni, C.K., Harder, P.J., 1983. Atmospheric trace elements at Enewetak Atoll 1, concentrations, sources and temporal variability. *Journal of Geophysical Research* 88, 5321–5342.

Finlayson-Pitts B. J. and Pitts J. N. Jr (1986) *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. Wiley, New York.

Janssen, L.H.J.M., Visser, H., 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, 2783-2796.

Organización Mundial de la Salud (2006) Air Quality Guidelines: Global Update 2005. Regional Office for Europa.

Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal (2010) Informe de Calidad del Aire en la Ciudad de México 2009

Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, UK.

US. EPA (2010) Our Nation`s Air. Status and Trends through 2008. EPA 454/ R09-002

Yao, X., Chan, C.K., Fang, M., Cadle, S., Chan, T., Mulawa, P., He, K., Ye, B., 2002. The water-soluble ionic composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai and Beijing, China. Atmospheric Environment 36, 4223–4234.

Zoller, W.H., Gordon, R.A., Duce, R.A., 1974. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole. Science 183, 198–200.

Zunckel M., Sainar C. y Zarauz J. (2003). Rainwater composition in Northeast Uruguay. Atmospheric Environment 37, 1601–1611.

## 6. Glosario de Términos

---

AEROSOL MARINO	Sustancia sólida o líquida que permanece suspendida en los gases de la atmósfera y tiene la misma composición del agua de mar (agua y cloruro sódico, sales de magnesio, calcio, potasio y sulfatos).
COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES	Se refiere a todos aquellos hidrocarburos que se encuentran en forma de gas o vapor a las condiciones ambientales de Costa Rica. Se producen durante la quema parcial de los combustibles fósiles, durante los incendios forestales y de la evaporación de solventes y combustibles. Las plantas pueden producir también este tipo de hidrocarburos y a estos se les denomina como biogénicos. Los COV al mezclarse con otros contaminantes atmosféricos forman el <i>smog</i> fotoquímico.
DIFUSION	Es el proceso por el cual el oxígeno se desplaza de los alvéolos a la sangre a través de pequeños vasos sanguíneos (capilares) que recubren las paredes alveolares. Una vez en la sangre, la hemoglobina realiza el transporte de oxígeno.
EFFECTOS AGUDOS	Se refiere a los efectos en la salud provocados por la exposición de corta duración a altas concentraciones de un contaminante.
EFFECTOS CRONICOS	Se refiere a los efectos en la salud provocados por la exposición de larga duración a concentraciones moderadas de un contaminante.
EMISIONES ANTROPOGÉNICAS	Se refieren a las emisiones contaminantes producidas por cualquier actividad realizada por y para el ser humano.

---

MORBILIDAD	Tasa de enfermedades o de discapacidad, por lo general expresada por cada 1000 habitantes.
MORTALIDAD	Tasa de defunciones por cantidad de población, por lo general expresada por cada 1000 habitantes.
OXIDACION	Reacción química en la que una sustancia se combina con oxígeno. En contaminación atmosférica, un ejemplo de ello es la formación de contaminantes secundarios que se producen como consecuencia de las reacciones físicas y químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera.