

# *Informe de Calidad del Aire en el Cantón de San José: Año 2011*



## PRESENTACIÓN

La conservación y recuperación de los recursos naturales es una prioridad para mejorar la calidad de vida de los habitantes del cantón de San José. El aire constituye un elemento fundamental para el desarrollo de la vida, sin embargo debido a los patrones de crecimiento que han venido experimentado la mayoría de centros urbanos de Latinoamérica, este elemento vital ha sufrido un considerable deterioro debido a la presencia de contaminantes en concentraciones superiores a las recomendadas por la Organización Mundial de la Salud. Es por ello que el Programa Agenda Verde San José, respaldado en un convenio de cooperación entre la Municipalidad de San José y la Universidad Nacional, tiene dentro de sus tareas más importantes el desarrollo de un riguroso plan de medición de los niveles de contaminantes criterio, utilizando para ello metodologías capaces de generar resultados con altos niveles de confiabilidad y representatividad. Estos datos no solamente son el resultado de un programa de vigilancia ambiental sino que están encaminados a ser indicadores que permitan retroalimentar los planes y políticas que a nivel municipal se están desarrollando en materia de gestión ambiental.

Este informe genera datos valiosos que le permitirá no solo a las autoridades municipales sino del gobierno central conocer de primera mano el estado que guarda la calidad del aire en el cantón. La información presentada en este informe es el resultado de un trabajo de equipo realizado por el personal técnico-operativo del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional y la Dirección de Gestión Ambiental de la Municipalidad de San José.

En conjunto con la sociedad trabajamos en hacer realidad la visión de una ciudad en donde la modernidad y la naturaleza convivan en armonía y en donde la tecnología proporcione soluciones innovadoras para la preservación del medio ambiente.

Ing. Jonhhy Araya Monge

Alcalde Municipal

## INDICE

Presentación	2
Índice	3
Introducción	4
Características de la red de monitoreo del cantón de San José	6
Resultados Año 2011	11
Conclusiones	31
Referencias	33

## INTRODUCCION

El aire es el fluido que forma la atmósfera de la Tierra. Éste es una mezcla gaseosa, que se compone principalmente de 21 partes de oxígeno y 78 partes de nitrógeno. El resto lo componen vapor de agua, gases nobles y dióxido de carbono. El equilibrio de esta concentración permite que los seres humanos puedan respirar sin tener afectaciones a la salud. Sin embargo, el aire que respiramos puede ser alterado debido a la presencia de otros compuestos. En este sentido se define como contaminante del aire al compuesto o compuestos que alteran nocivamente la concentración normal del aire ambiente y calidad del aire como el estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinados.

Los contaminantes pueden ser emitidos de manera natural, mediante los procesos de erosión del suelo, descomposición de materia orgánica, incendios forestales, y procesos volcánicos, entre otros. Los contaminantes emitidos por causa de las actividades del hombre son conocidos como contaminantes antropogénicos, y en su mayoría son resultado de la quema de combustibles fósiles.

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.

Algunos de los contaminantes del aire, por sus efectos en la salud de la población, han sido normados y se han establecido límites máximos de concentración en el aire ambiente. Estos contaminantes son conocidos como criterio. Los contaminantes criterio incluyen : el ozono ( $O_3$ ), el monóxido de carbono (CO), el bióxido de azufre ( $SO_2$ ), el bióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), las

partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2.5 micrómetros ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ).

Cuando el aire presenta concentraciones importantes de estos contaminantes en forma de partículas, gases o agentes biológicos, existe un potencial de efectos nocivos a la salud. La mayoría de los contaminantes comunes del aire presentan los siguientes efectos en los sistemas respiratorio y cardiovascular:

- Las concentraciones elevadas de dióxido de azufre ( $SO_2$ ) y material particulado en suspensión han sido asociadas con incrementos en la morbilidad y mortalidad, así como con el deterioro de las funciones respiratorias.
- El dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) y el ozono también afectan al sistema respiratorio; las exposiciones agudas pueden causar reacciones inflamatorias, disminución de la función pulmonar e incremento de la resistencia al paso del aire en las vías respiratorias. La presencia de oxidantes en el aire, como el ozono, puede irritar los ojos y dificultar la respiración cuando se hace ejercicio físico extremo. Las exposiciones prolongadas a este contaminante pueden provocar deterioro permanente de los órganos respiratorios.
- El monóxido de carbono (CO) tiene una alta afinidad con la hemoglobina y es capaz de hacer disminuir la concentración de oxígeno en la sangre, lo que provoca efectos negativos en el sistema cardiovascular nervioso y en el comportamiento.
- El plomo inhibe la síntesis de la hemoglobina en los glóbulos rojos de la médula ósea, perjudica las funciones del hígado y los riñones, y causa daños neurológicos.

Como ya se mencionó, los contaminantes criterio tienen asignado un límite máximo normado en el aire ambiente para determinar si éste es respirable sin afectar la salud humana. Para poder determinar la concentración de cada contaminante se han desarrollado numerosas técnicas para medir estas concentraciones, en sistemas conocidos como redes de monitoreo.

Al detectar la concentración de contaminantes del aire ambiente se está determinando su calidad. Así entonces, la calidad del aire puede ser definida por indicadores o índices preestablecidos que determinan la concentración de contaminantes en el aire ambiente ligada a escalas que califican esa calidad de forma cualitativa, cromáticas o numérica.

## **CARACTERÍSTICAS DE LA RED DE MONITOREO DEL CANTON DE SAN JOSÉ**

La medición de los atributos o estado que guarda el aire ambiente se conoce como medición de la calidad del aire. Dicha medición se puede llevar a cabo por medio del muestreo, análisis y el monitoreo de dicho aire ambiente. En lo que a calidad del aire se refiere, el muestreo se define como la medición de la contaminación del aire por medio de la toma de muestras, de forma discontinua. La muestra tomada deberá ser sometida a un análisis posterior en donde se detectará su concentración y caracterización.

La red de monitoreo de la calidad del aire del cantón de San José cuenta con las siguientes características:

-Usa una combinación de técnicas de muestreo tanto activo como pasivo. En el muestreo pasivo se colecta un contaminante específico por medio de su adsorción y/o absorción en un sustrato químico seleccionado. Después de su exposición por un periodo adecuado de muestreo, que puede variar desde una hora hasta meses o inclusive un año, la muestra se regresa al laboratorio donde se realiza la desorción del contaminante para ser analizado cuantitativamente. Los equipos utilizados se conocen como muestreadores pasivos que se presentan en diversas formas y tamaños, principalmente en forma de tubos o discos. Por otra parte las técnicas de muestreo activo requieren de energía eléctrica para succionar el aire a muestrear a través de un medio de colección físico o químico. El volumen adicional de aire muestreado incrementa la sensibilidad, por lo que

pueden obtenerse mediciones diarias promedio. Los muestreadores activos se clasifican en burbujeadores (gases) e impactadores (partículas); dentro de estos últimos, el más utilizado actualmente es el muestreador de alto volumen “High-Vol” (para PST, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>).

-Cuenta con la siguiente disposición de contaminantes y sitios de medición:

Contaminante	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
PM <sub>10</sub>	-Catedral Metropolitana (Comercial) -Plantel del MOPT (Comercial-Residencial) -Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca (Industrial-Comercial) -Registro Nacional Zapote (Comercial) -Centro de Reciclaje de Hatillo (Comercial-Residencial)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen  Muestreo de 24 horas	Gravimétrico
Iones en partículas PM <sub>10</sub>	-Catedral Metropolitana (Comercial) -Plantel del MOPT (Comercial-Residencial) -Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca (Industrial-Comercial) -Registro Nacional Zapote (Comercial) -Centro de Reciclaje de Hatillo (Comercial-Residencial)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen  Muestreo de 24 horas	Análisis de fluoruro (F <sup>-</sup> ), cloruro (Cl <sup>-</sup> ), nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) por cromatografía de intercambio iónico
Metales en partículas PM <sub>10</sub>	-Catedral Metropolitana (Comercial)	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto	Análisis de Vanadio (V), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo

Contaminante	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Plantel del MOPT (Comercial-Residencial)</li> <li>-Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca (Industrial-Comercial)</li> <li>-Registro Nacional Zapote (Comercial)</li> <li>-Centro de Reciclaje de Hatillo (Comercial-Residencial)</li> </ul>		volumen Muestreo de 24 horas	(Pb), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)
PM <sub>2,5</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca (Industrial-Comercial)</li> <li>-Plantel Central de la Municipalidad de San José (Comercial-Residencial)</li> </ul>	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Gravimétrico
Iones en partículas PM <sub>2,5</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca (Industrial-Comercial)</li> <li>-Plantel Central de la Municipalidad de San José (Comercial-Residencial)</li> </ul>	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Análisis de fluoruro (F <sup>-</sup> ), cloruro (Cl <sup>-</sup> ), nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) por cromatografía de intercambio iónico
Metales en partículas PM <sub>2,5</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca (Industrial-Comercial)</li> <li>-Plantel Central de la Municipalidad de San José (Comercial-Residencial)</li> </ul>	3 veces por semana	Activo con muestreadores de alto volumen Muestreo de 24 horas	Análisis de Vanadio (V), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Plomo (Pb), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Níquel (Ni), Sodio (Na), Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg)



Contaminante	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
NO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Hospital San Juan de Dios</li> <li>-Costado Norte Catedral Metropolitana</li> <li>-Avenida 10, Bomba La Castellana</li> <li>-Estación de Ferrocarriles al Pacífico</li> <li>-Barrio Luján</li> <li>-Barrio Francisco Peralta</li> <li>-Tribunal Supremo de Elecciones</li> <li>-Barrio Escalante</li> <li>-JAPDEVA</li> <li>-Barrio México</li> <li>-Parque El Salvador</li> <li>-Barrio Cuba</li> <li>-Avenida 10, Edificio del AyA</li> <li>-Barrio La Cruz</li> </ul>	1 vez por mes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pasivo con tubos de permeación</li> <li>Muestreo de 22 días</li> </ul>	Espectrofotométrico

-Las mediciones se respaldan en la acreditación de las pruebas realizadas por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional por parte del Ente Costarricense de Acreditación según consta en el expediente LE-024, el cual puede ser consultado en la página web:

[www.eca.or.cr](http://www.eca.or.cr).

-Dispone de monitoreo de precipitación total (lluvia ácida) de acuerdo con las siguientes características:

Parámetro	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
pH	-Ministerio de Seguridad Pública (Comercial) -Biblioteca Nacional (Comercial) -Municipalidad de San José, Edificio Central (Comercial) -ICE, Edificio Central (Comercial) -Sección de Parques Municipalidad de San José (Comercial)	5 veces por semana	Colector de precipitación Total	Electrométrico
Conductividad	-Ministerio de Seguridad Pública (Comercial) -Biblioteca Nacional (Comercial) -Municipalidad de San José, Edificio Central (Comercial) -ICE, Edificio Central (Comercial) -Sección de Parques Municipalidad de San José (Comercial)	5 veces por semana	Colector de precipitación Total	Electrométrico
Iones	-Ministerio de Seguridad Pública (Comercial) -Biblioteca Nacional (Comercial) -Municipalidad de San	5 veces por semana	Colector de precipitación Total	Análisis de fluoruro (F <sup>-</sup> ), cloruro (Cl <sup>-</sup> ), nitrato (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ), sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ), fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) por

Parámetro	Sitios de Medición	Frecuencia	Tipo de Muestreo	Método de análisis
	José, Edificio Central (Comercial) -ICE, Edificio Central (Comercial) -Sección de Parques Municipalidad de San José (Comercial)			cromatografía de intercambio iónico

## RESULTADOS AÑO 2011

### PARTÍCULAS $PM_{10}$ y $PM_{2,5}$ :

Las partículas suspendidas (PM, por sus siglas en inglés) forman una mezcla compleja de materiales sólidos y líquidos suspendidos en el aire, que pueden variar significativamente en tamaño, forma y composición, dependiendo fundamentalmente de su origen. El tamaño de las partículas suspendidas varía desde 0,005 hasta 100 micras de diámetro aerodinámico; esto es, desde unos cuantos átomos hasta aproximadamente el grosor de un cabello humano.

Las partículas pueden tener un origen natural (como la polinización de las plantas, procesos geológicos e incendios forestales), y también antropogénico (que puede incluir desde la quema de combustibles hasta la fertilización de campos agrícolas). Las partículas pueden ser directamente emitidas de la fuente, las llamadas partículas primarias, o bien formarse en la atmósfera cuando en ésta reaccionan algunas sustancias (óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, amoníaco, compuestos orgánicos, etc.), siendo consideradas partículas secundarias.

El estudio y la regulación ambiental de las partículas empezó centrándose en las partículas suspendidas totales (PST), las cuales son menores de 100  $\mu m$  de diámetro aerodinámico. Posteriormente, la atención se centró en las partículas con diámetros aerodinámicos menores de

10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), y actualmente, en las partículas finas y ultra finas, es decir, las menores de 2.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y 1  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_1$ ), respectivamente. En los Estados Unidos la regulación de las PST empezó en 1971, agregando normas para  $\text{PM}_{10}$  en 1987 y para  $\text{PM}_{2.5}$  en 1997 (USEPA, 2006). En Costa Rica, la norma que regula los niveles de  $\text{PM}_{10}$  entró en vigor en 2002 y no ha sido revisada a la fecha.

Por su tamaño, las  $\text{PM}_{2.5}$  permanecen en el aire más tiempo y se transportan a mayores distancias que las  $\text{PM}_{10}$ , por lo que las fuentes de emisión de  $\text{PM}_{2.5}$  primarias o de los precursores de  $\text{PM}_{2.5}$  secundarias pueden encontrarse lejos de los sitios donde se monitorean (Finlayson-Pitts *et al.*, 2000). La fracción gruesa de las partículas suspendidas, con diámetro aerodinámico entre 2,5 micras y 10 micras, en general se deposita más rápidamente, con una vida media en la atmósfera de sólo minutos u horas y, por ende, presenta mayor variabilidad espacial dentro de una misma región (WHO, 1999).

En la tabla 1, se pueden observar los promedios diarios obtenidos para la concentración de  $\text{PM}_{10}$  en los cinco sitios de monitoreo ubicados en el cantón de San José. Para estos sitios, el promedio anual varía desde 22 hasta 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  sin superar el límite de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  contenido en el Decreto 30221-S como límite máximo anual. Es importante mencionar que en ninguno de los días de muestro se obtuvieron concentraciones mayores al límite establecido (150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) como promedio de 24 horas en el Decreto 30221-S.

Para todos los sitios de monitoreo los meses de marzo, abril y mayo (figura 1) presentaron los niveles más altos de partículas  $\text{PM}_{10}$ , de tal forma que durante la época seca (diciembre-abril) se presentaron promedios un 10% menores en comparación con los valores registrados para la época lluviosa, con excepción del sitio ubicado en Hatillo, donde el promedio fue de 35 y 28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para época seca y lluviosa respectivamente.

**Tabla 1. Concentración de partículas  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) registradas en los sitios de monitoreo del cantón de San José, año 2011.**

<b>Fecha</b>	<b>Catedral Metropolitana</b>	<b>Plantel del MOPT</b>	<b>Registro Nacional, Zapote</b>	<b>Centro de Reciclaje Hatillo, Municipalidad de San José</b>	<b>Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca</b>
11/01/2011			17	19	24
12/01/2011			15	15	18
13/01/2011			21	16	17
17/01/2011			20	21	20
18/01/2011			21	25	26
19/01/2011			24	38	28
26/01/2011		27	21	30	27
27/01/2011		21	19	29	24
31/01/2011			21		27
01/02/2011			20		29
03/02/2011			23		31
07/02/2011	24		23	39	28
08/02/2011	22		20	38	22
09/02/2011			19	29	25
10/02/2011	33				
15/02/2011	36	13	13	14	20
16/02/2011	22	20	18	25	
17/02/2011	17	12	22	23	
21/02/2011			20		27
22/02/2011	21	28	18	30	33
23/02/2011			34		28
28/02/2011			21		19
01/03/2011	17	26	18	27	18
02/03/2011	20	30		144	
03/03/2011			23		23

<b>Fecha</b>	<b>Catedral Metropolitana</b>	<b>Plantel del MOPT</b>	<b>Registro Nacional, Zapote</b>	<b>Centro de Reciclaje Hatillo, Municipalidad de San José</b>	<b>Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca</b>
04/03/2011	21				
07/03/2011	28	40	28		34
09/03/2011	20	24	25		30
10/03/2011		36	25		31
15/03/2011	40	15	21		28
16/03/2011	13	18	21	111	34
17/03/2011	12		17	25	34
21/03/2011	12		19	27	60
22/03/2011			14		26
23/03/2011	24	25		29	
24/03/2011	20	21	19	26	30
28/03/2011		26		36	38
29/03/2011		37		41	46
30/03/2011		45		54	58
05/04/2011				26	36
06/04/2011				31	38
07/04/2011				33	43
13/04/2011		36		30	25
14/04/2011				46	
25/04/2011				45	49
26/04/2011		34		44	33
28/04/2011				46	34
02/05/2011		14	14		26
03/05/2011		13	34	20	32
04/05/2011		11	16	15	23

<b>Fecha</b>	<b>Catedral Metropolitana</b>	<b>Plantel del MOPT</b>	<b>Registro Nacional, Zapote</b>	<b>Centro de Reciclaje Hatillo, Municipalidad de San José</b>	<b>Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca</b>
09/05/2011	72	27		30	
10/05/2011	10	15	10	16	17
11/05/2011			22		29
12/05/2011	26	37		73	
16/05/2011			44		62
17/05/2011	33	39	39	73	51
18/05/2011	35	23		141	
19/05/2011		31	46	50	61
23/05/2011		22	27		40
25/05/2011			43		54
26/05/2011			31	39	79
30/05/2011			26	35	43
31/05/2011	26		27	33	37
01/06/2011	23				
02/06/2011			22	27	30
06/06/2011			19		33
07/06/2011	22	126	26	39	38
09/06/2011	83	42	32	56	34
14/06/2011	12	16	19	38	25
15/06/2011	22	22	22	27	32
16/06/2011			30		31
21/06/2011		20			22
22/06/2011		17	25	39	28
23/06/2011		26	32	37	33
27/06/2011	26	18	18	26	35

<b>Fecha</b>	<b>Catedral Metropolitana</b>	<b>Plantel del MOPT</b>	<b>Registro Nacional, Zapote</b>	<b>Centro de Reciclaje Hatillo, Municipalidad de San José</b>	<b>Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca</b>
28/06/2011			35		32
29/06/2011	36	36		36	
30/06/2011			27		35
04/07/2011	30	29	25	39	
05/07/2011	30	20		27	31
06/07/2011			23		41
07/07/2011	18	26	17	34	43
11/07/2011	21	29		16	
12/07/2011	25	25	28	32	32
13/07/2011			20		48
14/07/2011	29	23	30	30	
17/07/2011					46
18/07/2011	23	21		28	
19/07/2011	21	20		23	
20/07/2011	16		20		28
21/07/2011		17	15	20	25
27/07/2011	23	23	23	21	31
28/07/2011	28	18	28		33
03/08/2011	24		19	30	31
04/08/2011	22	25	24	22	32
05/08/2011		25			
08/08/2011	19	24	23	28	
09/08/2011	25	24	30	27	
11/08/2011	28	28		25	32
17/08/2011	19	20	17	22	26



<b>Fecha</b>	<b>Catedral Metropolitana</b>	<b>Plantel del MOPT</b>	<b>Registro Nacional, Zapote</b>	<b>Centro de Reciclaje Hatillo, Municipalidad de San José</b>	<b>Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca</b>
18/08/2011	42	27	22	29	32
22/08/2011			18		28
23/08/2011			29		42
25/08/2011			24		37
29/08/2011	30		26	34	44
30/08/2011	31		28	39	
01/09/2011	34		35	36	44
05/09/2011	19		22	27	35
06/09/2011	23				
07/09/2011	28		23	32	30
08/09/2011	24		22	28	29
12/09/2011	18		18	23	27
13/09/2011			29	36	31
19/09/2011			24		33
20/09/2011				39	
21/09/2011			24		36
22/09/2011			19	24	27
26/09/2011			23	23	30
27/09/2011			27	42	35
28/09/2011			29	40	
03/10/2011			23		33
05/10/2011			18	23	25
06/10/2011			17	20	21
10/10/2011			12	14	21
12/10/2011	26		12	19	16

<b>Fecha</b>	<b>Catedral Metropolitana</b>	<b>Plantel del MOPT</b>	<b>Registro Nacional, Zapote</b>	<b>Centro de Reciclaje Hatillo, Municipalidad de San José</b>	<b>Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca</b>
13/10/2011	23			17	
18/10/2011	17		13	11	31
19/10/2011	19		15	13	28
24/10/2011	15			21	
25/10/2011	15		18	17	24
27/10/2011	24			22	14
31/10/2011	28			27	36
01/11/2011	28		23	30	22
03/11/2011	14		14	19	21
04/11/2011					20
07/11/2011	13		14	17	
08/11/2011	17		23	21	31
10/11/2011	14		22	22	29
14/11/2011	21		32	10	
15/11/2011	20				
16/11/2011	23				
21/11/2011			18		20
22/11/2011	17		16	20	21
23/11/2011	13		18	27	20
28/11/2011	13		16	19	29
29/11/2011	12		19	19	23
01/12/2011			14	14	31
05/12/2011			19		26
06/12/2011			20		25
07/12/2011			15		24

Fecha	Catedral Metropolitana	Plantel del MOPT	Registro Nacional, Zapote	Centro de Reciclaje Hatillo, Municipalidad de San José	Compañía Nacional de Fuerza y Luz, La Uruca
Promedio	24	26	22	32	32
Valor Máximo en 24 horas	83	126	46	144	79
Valor Mínimo en 24 horas	10	11	10	10	14
s	11	15	7	21	10

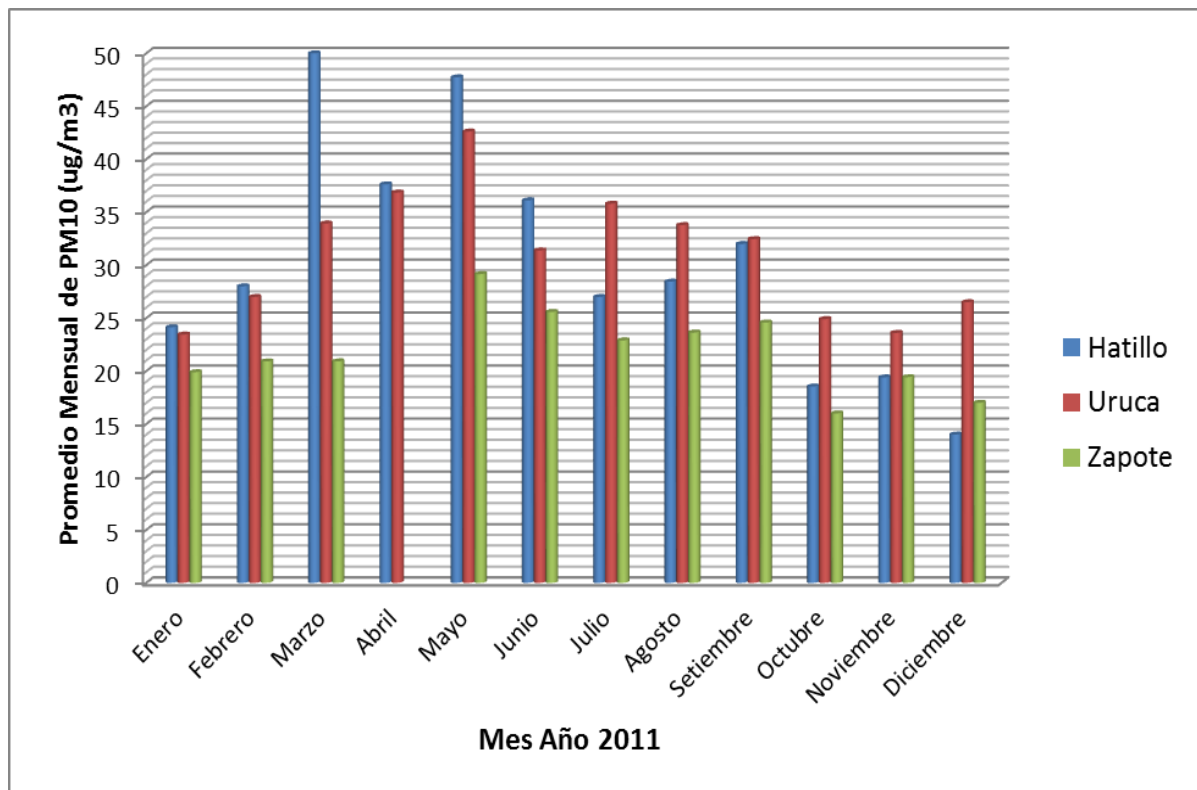


Figura 1. Variación de los promedios mensuales de partículas  $PM_{10}$  registrados en los sitios de monitoreo La Uruca, Hatillo y Zapote durante el año 2011.

Si se compara el promedio anual de partículas  $PM_{10}$  para el año 2011, en cada uno de los sitios de muestreo, con el valor obtenido para el año 2010 (Tabla 2) se puede observar que el 100% de los

sitios de monitoreo se presentan descensos en los valores, sin embargo solo en tres casos: Catedral Metropolitana, Zapote y Hatillo esta disminución es significativa con respecto a la incertidumbre de los datos.

En las tablas 3 y 4 se muestra un análisis de los principales constituyentes químicos de las partículas  $PM_{10}$  en donde sobresale el sulfato y el fosfato como iones predominantes, mientras que el aluminio y el manganeso constituyen los metales mayoritarios. La concentración de estas especies varía en forma significativa con el sitio de muestreo, ya que las mayores concentraciones de iones secundarios como sulfato se presentan en sitios ubicados en zonas industriales o de alto flujo vehicular. Este patrón de distribución se repite para el caso de la concentración de especies metálicas, especialmente en el caso del Ni, Cu y Mn.

**Tabla 2. Evolución de los promedios aritméticos anuales de partículas  $PM_{10}$  en el cantón de San José, 2010-2011**

Año	Catedral Metropolitana	Plantel del MOPT	Hatillo	La Uruca	Zapote
2011	24	26	32	32	22
2010	28		37	35	29

Todos los datos poseen una incertidumbre de  $\pm 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$

**Tabla 3. Composición iónica ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de las partículas  $PM_{10}$  colectadas en el cantón de San José, 2011**

	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Acetato	Oxalato	Formiato
--	----------------	-----------------	------------------------------	-----------------	------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------	---------	---------	----------

Catedral	0,34 (0,44)	1,07 (0,61)	0,38 (0,11)	0,27 (0,12)	0,88 (0,45)	1,23 (0,81)	3,51 (2,13)	0,47 (0,41)	nd	0,06 (0,08)	0,13 (0,03)
MOPT	0,35 (0,30)	1,52 (0,79)	0,49 (0,19)	0,35 (0,21)	1,17 (0,38)	1,38 (0,75)	5,29 (2,83)	0,45 (0,32)	nd	0,12 (0,05)	0,14 (0,03)
Hatillo	0,30 (0,35)	1,26 (0,84)	0,40 (0,22)	0,28 (0,10)	0,94 (0,49)	1,37 (1,00)	3,95 (2,59)	0,40 (0,34)	nd	0,07 (0,04)	0,13 (0,05)
La Uruca	0,22 (0,32)	1,22 (0,78)	0,25 (0,11)	0,19 (0,06)	0,79 (0,53)	1,30 (1,13)	4,20 (2,77)	0,78 (0,57)	0,38 (0,03)	0,09 (0,05)	0,13 (0,05)
Zapote	0,15 (0,14)	1,01 (0,72)	0,26 (0,16)	0,38 (0,28)	0,82 (0,55)	1,31 (1,00)	4,04 (3,92)	0,82 (0,78)	0,42 (0,11)	0,20 (0,11)	0,22 (0,21)

El dato colocado entre paréntesis corresponde a la desviación estándar del parámetro

**Tabla 4. Concentración de especies metálicas (ng/m<sup>3</sup>) presentes en las partículas PM<sub>10</sub> colectadas en el cantón de San José, 2011**

	Pb	Cu	Ni	Cr	Na	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	V
Catedral	6,82 (4,71)	7,65 (3,15)	2,86 (4,02)	12,2 (10,9)	2139 (1100)	141 (50)	636 (1218)	347 (586)	98 (53)	19,8 (13,5)	27,2 (56,1)	2,27 (0,98)
MOPT	14,7 (11,1)	31,2 (27,5)	3,52 (3,68)	17,4 (24,9)	3693 (2189)	258 (447)	506 (748)	304 (400)	464 (833)	210 (200)	242 (98)	1,55 (0,17)
Hatillo	10,0 (6,9)	13,9 (4,1)	3,63 (3,51)	6,76 (3,83)	2851 (1117)	234 (319)	521 (821)	185 (78)	540 (209)	41 (23)	253 (164)	2,21 (0,70)
La Uruca	5,66 (4,52)	6,65 (5,62)	7,70 (8,31)	9,18 (9,33)	2653 (1189)	262 (86)	270 (101)	169 (83)	1192 (1232)	27,0 (8,1)	413 (175)	2,54 (0,92)
Zapote	8,75 (8,02)	172 (186)	5,36 (6,99)	6,50 (6,10)	1628 (308)	257 (145)	240 (72)	133 (67)	427 (139)	14,3 (6,1)	232 (132)	1,71 (0,48)

El dato colocado entre paréntesis corresponde a la desviación estándar del parámetro

En las tablas 5 y 6 se presentan las concentraciones medias, máximas y mínimas de los diferentes componentes mayoritarios y traza analizados en las muestras de partículas PM<sub>2,5</sub> colectadas en los diferentes sitios de muestreo ubicados en el cantón de San José. Destacan las mayores

concentraciones de partículas  $PM_{2,5}$  en la zona industrial (La Uruca:  $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) frente a los niveles muy poco menores registrados en la zona comercial ( $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Sin embargo, los sitios de muestreo incumplen la norma anual de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y de México de  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para este contaminante.

**Tabla 5. Concentraciones medias anuales, máximas y mínimas de los componentes mayoritarios en  $PM_{2,5}$  en el cantón de San José, año 2011.**

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	La Uruca			Municipalidad de San José		
	$\bar{Y}$	Max	Min	$\bar{Y}$	Max	Min
<b>N</b>	75			64		
<b>PM</b>	28	58	7	24	42	13
<b>OC</b>	5,73	12,0	3,23	7,81	13,2	2,91
<b>EC</b>	4,5	7,35	1,78	2,77	2,61	1,24
<b>F<sup>-</sup></b>	0,04	0,07	0,03	0,07	0,10	0,04
<b>Cl<sup>-</sup></b>	0,52	0,78	0,34	0,48	0,69	0,25
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	0,15	0,27	0,11	0,23	0,32	0,16
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,63	0,84	0,29	0,83	0,95	0,44
<b>PO<sub>4</sub><sup>3-</sup></b>	0,31	0,45	0,16	0,54	0,67	0,26
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	3,34	4,76	1,42	3,82	4,72	1,61
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	1,59	2,35	0,72	1,83	2,11	0,77
<b>Ca</b>	0,21	0,45	0,13	0,15	0,22	0,09
<b>Mg</b>	0,047	0,060	0,034	0,052	0,065	0,033
<b>Na</b>	0,61	0,74	0,40	0,57	0,69	0,34
<b>K</b>	0,36	0,53	0,27	0,4	0,65	0,17
<b>Al</b>	0,33	0,48	0,26	0,3	0,48	0,11

$\mu\text{g}/\text{m}^3$	La Uruca			Municipalidad de San José		
	$\bar{Y}$	Max	Min	$\bar{Y}$	Max	Min
Fe	0,25	0,38	0,14	0,17	0,30	0,08

Tabla 6. Concentraciones medias anuales, máximas y mínimas de los componentes minoritarios en  $\text{PM}_{2,5}$  en el cantón de San José, año 2011.

$\text{ng}/\text{m}^3$	La Uruca			Municipalidad de San José		
	Media	Max	Min	Media	Max	Min
V	2,9	4,1	1,0	2,7	5,4	1,9
Cr	7,0	9,2	3,8	7,3	11,1	3,5
Cu	43	75	20	60	105	27
Ni	3,86	5,07	2,84	4,05	5,27	3,58
Pb	7,61	9,93	4,15	8,42	12,4	4,77
Mn	61	94	32	65	117	21

Con el fin de realizar la reconstrucción de la masa de las partículas  $\text{PM}_{2,5}$  en cada sitio de muestreo, se asumió que las partículas se pueden clasificar en 6 grandes grupos: iones secundarios, material cristal, carbono elemental, materia orgánica, aerosol marino y metales traza. Para realizar la reconstrucción de masa, se siguió el procedimiento recomendado por Chan et al. (1997). La suma de la concentración de sulfato, nitrato y amonio permitió calcular la fracción de iones secundarios. La materia orgánica se puede obtener multiplicando la concentración de carbono orgánico por 1,4. Este factor asume que la masa de materia orgánica contiene un 71% de carbono en peso y se utiliza para considerar el hidrógeno y el oxígeno no incluido durante el análisis de carbono.

La masa de material crustal se estima con base a las contribuciones de los óxidos de Al, Ca, Fe, Si, Ti, Mg y K de acuerdo con la siguiente ecuación:

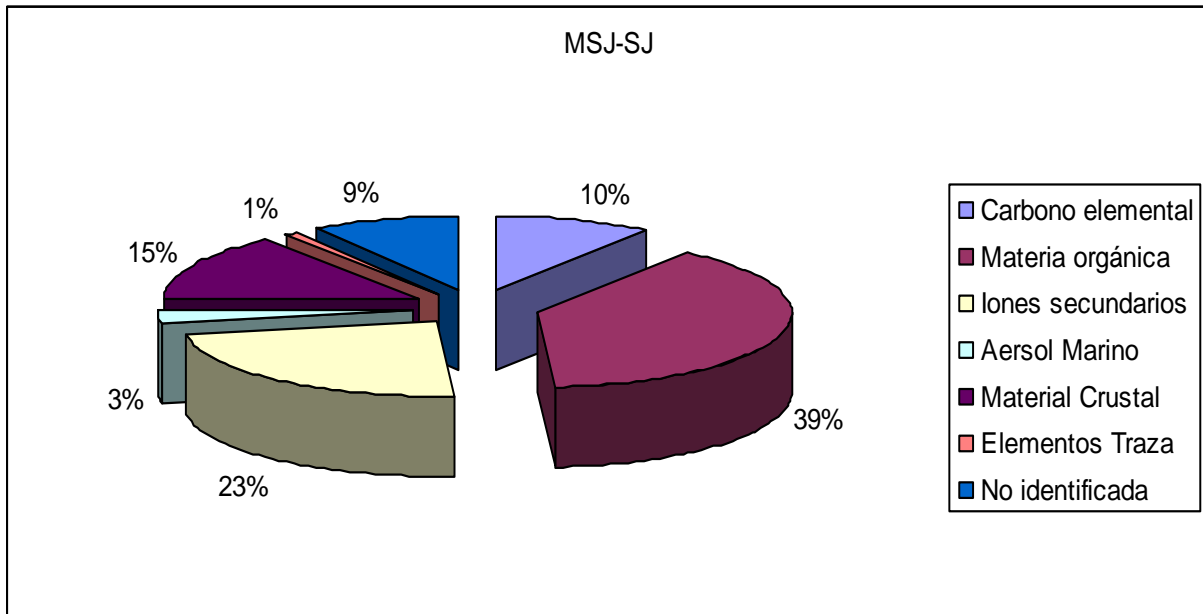
$$\text{Material crustal} = (1,89\text{Al} + 1,21\text{K} + 1,43\text{Ca} + 1,66\text{Mg} + 1,7\text{Ti} + 2,14\text{Si})$$

El silicio elemental se estimó multiplicando la concentración de Al por 3,41. El aporte del aerosol marino se determinó a partir de la suma de Cl y las fracciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ , Na, Ca, K y Mg de origen marino. Estas fracciones se calcularon de la siguiente forma:  $\text{Na}_{am} = 0,566\text{Cl}$ ,  $\text{Ca}_{am} = 0,038\text{Na}_{am}$ ,  $\text{Mg}_{am} = 0,12\text{Na}_{am}$ ,  $\text{K}_{am} = 0,036\text{Na}_{am}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}\text{am} = 0,252\text{Na}_{am}$ . Por último los metales traza se consideraron en forma de sus respectivos óxidos de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Metales traza} = 1,47[\text{V}] + 1,29[\text{Mn}] + 1,27[\text{Ni}] + 1,25[\text{Cu}] + 1,08[\text{Pb}] + 1,31[\text{Cr}]$$

El aporte crustal a las partículas  $\text{PM}_{2,5}$  corresponde a un 15% (figura 2), lo anterior se puede deber a la existencia de terrenos no urbanizados en estas regiones, los cuales están sujetos a los procesos de resuspensión por acción del viento o por la circulación de los vehículos sobre carreteras pavimentadas. El aporte del aerosol marino alcanza un 3% mientras que los niveles de materia orgánica y carbono elemental (OM+EC) representan entre 39 y 10% de la masa total de partículas  $\text{PM}_{2,5}$ . Estos resultados muestran la importancia del aporte de los procesos de combustión a la composición de las partículas finas. Los metales traza representan la contribución más pequeña.





**Figura 2. Composición media de las partículas  $PM_{2,5}$  colectadas en el edificio “José Figueres Ferrer” de la Municipalidad de San José, 2011**

Si se comparan los datos de  $PM_{2,5}$  obtenidos con las mediciones simultáneas de  $PM_{10}$  en el sitio de monitoreo de La Uruca, se puede observar que las partículas  $PM_{2,5}$  representan entre el 59 al 65% de las  $PM_{10}$

## **ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO<sub>2</sub> Y NO):**

El término óxido de nitrógeno puede referirse a alguno de los siguientes compuestos: NO (óxido nítrico); NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno); N<sub>2</sub>O (óxido nitroso); N<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (trióxido de dinitrógeno); N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (tetraóxido de dinitrógeno) y N<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (pentóxido de dinitrógeno). Desde el punto de vista de la contaminación del aire sólo los dos primeros tienen importancia y sólo el dióxido (NO<sub>2</sub>) es un contaminante criterio. Por lo general, los óxidos de nitrógeno, NO<sub>x</sub>, son la mezcla de NO y NO<sub>2</sub>. Estos gases tienen en común que ambos son reactivos, tienen un solo átomo de nitrógeno y son generados en procesos de combustión (sobre todo a altas temperaturas). A temperatura ambiente, el nitrógeno (N<sub>2</sub>) del aire no puede combinarse con el oxígeno debido a la gran estabilidad del triple enlace de su molécula, pero éste se rompe cuando hay suficiente energía, lo que se manifiesta por el aumento de la temperatura y entonces los átomos de nitrógeno ya pueden reaccionar con el oxígeno dando, sobre todo, NO el cual, en presencia de un exceso de oxígeno se oxida produciendo NO<sub>2</sub>. En áreas de mucho tránsito vehicular, como es el caso en las grandes ciudades, las emisiones de NO<sub>x</sub> son muy importantes. El monóxido de nitrógeno, óxido nítrico u óxido de nitrógeno NO es un gas incoloro y poco soluble en agua. Se le considera un agente tóxico.

El NO<sub>2</sub> es un gas tóxico e irritante de color marrón amarillento. 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 aumenta con niveles superiores a  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  equivalente a 0,136 ppm (Organización Mundial de la Salud, 2006).

En la tabla 7 se presentan los promedios anuales obtenidos para cada uno de los sitios de muestreo de dióxido de nitrógeno ubicados en el cantón de San José. Tal como se puede observar de los 14 sitios de monitoreo, al menos 4 presentan concentraciones superiores al criterio de la Organización Mundial de la Salud. Las concentraciones mayores se presentan para sitios comerciales con alto flujo vehicular en donde se llegan a alcanzar excedencias de hasta un 10% con respecto al valor criterio de la Organización Mundial de la Salud de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Si se comparan estos valores con los obtenidos para años anteriores se registra una tasa de incremento de 12 y 10% para sitios comerciales e industriales respectivamente. Es importante indicar que esta tasa es ligeramente menor a la registrada en años anteriores donde se registraban incrementos de hasta 15% para zonas comerciales de alto flujo vehicular

**Tabla 7. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) registrados para los sitios de monitoreo ubicados en el cantón de San José, 2011.**

	Cantón	Sitio de muestreo	Tipo de sitio	Promedio Anual (µg/m <sup>3</sup> )
1	San José	Hospital San Juan de Dios	Comercial	55
2	San José	Catedral Metropolitana, Avenida Segunda	Comercial	43
3	San José	150 m norte de la Antigua Estación al Pacífico	Comercial	29
4	San José	Bomba La Castellana, Avenida 10	Comercial	42
5	San José	Barrio Lujan, Antigua Dos Pinos	Residencial	26
6	San José	MINAET, Barrio Francisco Peralta	Residencial	26
7	San José	Barrio La Cruz	Residencial	21
8	San José	Edificio de AyA sobre avenida 10	Comercial	29
9	San José	Costado Sur, Tribunal Supremo de Elecciones	Comercial	20
10	San José	Iglesia Santa Teresita	Comercial	23
11	San José	Edificio JAPDEVA	Comercial	40
12	San José	Barrio México	Comercial	26
13	San José	Parque El Salvador, Barrio Pithaya	Comercial	29
14	San José	Barrio Cuba	Industrial	41

## DEPOSITACIÓN TOTAL

Los gases y partículas contaminantes que son emitidos a la atmósfera por fuentes de combustión, como las emisiones vehiculares y las emisiones industriales, inclusive los procesos naturales como las emisiones volcánicas e incendios forestales, contienen concentraciones importantes de óxidos de nitrógeno y azufre que al reaccionar con el agua atmosférica producen compuestos ácidos como el ácido nítrico y el ácido sulfúrico. Estos compuestos pueden depositarse sobre la superficie de la tierra, ya sea por vía seca o húmeda.

En ausencia de lluvia, los compuestos ácidos pueden adherirse a las partículas de polvo o humo, para luego depositarse sobre el suelo, edificios, casas, automóviles y árboles. Estas partículas pueden ser removidas de estas superficies por la lluvia, y el agua del escurrimiento forma una mezcla aún más ácida.

La deposición húmeda ocurre cuando los contaminantes en el aire son arrastrados hasta áreas o regiones donde el clima es húmedo, los ácidos se disuelven en el agua presente en la atmósfera y son acarreados hacia el suelo por la lluvia, la nieve, la niebla o el rocío. Debido a que esta agua ácida se deposita en varios tipos de superficies, puede tener un impacto directo en la vegetación y los animales acuáticos. Los efectos que tiene en el medio ambiente dependen de factores como: el grado de acidez del agua, la cantidad de lluvia, la composición y capacidad amortiguadora de los suelos afectados.

En condiciones naturales el agua de lluvia tiene un pH de 5.6, lo que la hace ligeramente ácida debido a la presencia de pequeñas cantidades de dióxido de carbono existentes en la atmósfera que reaccionan con el agua formando ácido carbónico, ambos compuestos se encuentran en equilibrio químico en una reacción reversible. Cuando el agua de lluvia tiene un pH menor a este valor se le conoce como lluvia ácida. La lluvia ácida no tiene un impacto directo sobre la

salud humana, sin embargo, si tiene un efecto grave en los ecosistemas al modificar la composición del suelo y el agua.

En la tabla 8 se muestran los resultados de la composición química de las muestras de precipitación total colectadas en el área metropolitana durante el año 2011. Los valores presentados en dicho cuadro se encuentran ponderados por volumen utilizando los datos de precipitación diaria colectada.

**Tabla 8. Composición química de las muestras de precipitación total colectadas en el Gran área metropolitana de Costa Rica, 2011.**

	pH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/l	Cl- mg/l	F- mg/l	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l
San José	3,77	2,21	0,94	0,88	0,10	0,41
Heredia	3,82	2,32	0,75	1,12	0,08	0,49
Belén	3,95	2,11	0,83	0,93	0,08	0,44

Las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las muestras de precipitación total obedecen el siguiente orden: SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> > Cl<sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Los valores promedio ponderados por volumen de pH más ácidos, se registran en los sitios localizados en San José, los cuales se caracterizan por estar ubicados en zonas comerciales de alto flujo vehicular.

## CONCLUSIONES

-Los niveles de partículas finas registrados en el cantón de San José, superan las normas anuales establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Lo anterior, requiere de la formulación de un plan integral de intervención que permita entre otros: analizar los flujos de vehículos en las principales vías del cantón con el fin de maximizar las velocidades de circulación, diseñar rutas específicas para el desplazamiento de vehículos de carga pesada, incentivar el uso de transporte público masivo sobre opciones de transporte individualizado , control e inspección de emisiones generadas en fuentes fijas que utilicen diesel y bunker principalmente.

2. Tanto las concentraciones máxicas como la composición química de las partículas PM<sub>2,5</sub> presentan un patrón de variabilidad estacional bien definido, en donde los aportes crustales y de aerosol marino presentan sus máximos valores durante la época seca y disminuyen con la entrada de las brisas del Pacífico que son las encargadas de generar las lluvias durante los meses de mayo a noviembre.

3. A partir de la identificación de las fuentes que contribuyen a los niveles de PM<sub>2,5</sub> se hace necesario inventariar, con la mayor exactitud posible cada una de ellas, con el fin de determinar las emisiones reales generadas, como punto de partida para poder establecer las políticas y planes requeridos para lograr una reducción sistemática de este contaminante.

4. Existe una tendencia a incrementar el grado de acidificación de las muestras de precipitación

total, ya que el número de eventos al año con pH inferior a 5,60 está incrementado a una tasa de 16,5% anual en el período 2007-2011, razón por la cual se debe explorar más a fondo las causas de este fenómeno

5. Persiste el crecimiento en los niveles de dióxido de nitrógeno en sitios comerciales e industriales del cantón de San José, aunque la tasa de crecimiento para este año fue ligeramente menor en comparación con el período anterior.

6. Debido a la ocurrencia de valores de concentración de contaminantes que superan las normas de calidad del aire es importante pensar en fortalecer el monitoreo de la calidad del aire y propiciar la migración del sistema actual a un sistema automático, que permita analizar los ciclos horarios de variación de los contaminantes.



## REFERENCIAS

Finlayson-Pitts, B. J.; Pitts, J. N. (2006). Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques. John Wiley & Sons. USA

Organización Mundial de la Salud. (2006a). Air Quality Guidelines. Global update 2005. Regional Office for Europe.

Organización Mundial de la Salud. (2006b). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005.

[Disponible en [http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf](http://whqlibdoc.who.int/hq/2006/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf)].

US Environmental Protection Agency. (2006). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).[Disponible en <http://www.epa.gov/air/criteria.html> - consultada el 9/04/2012].