

Estado de la Calidad del Aire

Área Metropolitana de Costa Rica



Quinto Informe: Año 2012



Dr. René Castro Salazar

Ministro de Ambiente y Energía

Dra. Daisy Corrales Díaz

Ministra de Salud

Dr. Pedro Castro Fernández

Ministro de Obras Públicas y Transportes

Dra. Sandra García Pérez

Alcaldesa Municipalidad de San José

Licda. Sandra León Coto

Rectora Universidad Nacional

La redacción técnica del presente informe estuvo a cargo del Dr. Jorge Herrera Murillo coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional. Para mayor información contactar al email: jherrer@una.cr

El monitoreo de la calidad del aire en el Área Metropolitana de Costa Rica se realiza gracias al financiamiento aportado por la Universidad Nacional, el Ministerio de Ambiente y Energía, el Ministerio de Salud y la Municipalidad de San José.

Se agradece al Observatorio Ambiental de la Municipalidad de Belén por el aporte de la información de la calidad del aire de dicho cantón para ser incluida en el presente informe.

Presentación

La evolución de las sociedades modernas se ha caracterizado por un uso intensivo de los recursos naturales y una degradación sostenida del medio ambiente, de la cual el aire ha sido una víctima más. Las necesidades de desarrollo de infraestructura, los patrones de movilización en centros urbanos, la creciente demanda energética, la falta de planificación urbana son solo algunos de los factores de presión que están originando la emisión de importantes cantidades de contaminantes al aire en países desarrollados, pero especialmente en aquellos que se encuentran en vías de desarrollo.

En la última década, se han presentado numerosos estudios que evidencian que los contaminantes atmosféricos tienen efectos adversos no sólo en materia de salud pública sino también en afectaciones a los ecosistemas y otros recursos materiales. Diversos estudios epidemiológicos han permitido elaborar índices de riesgo que relacionan los cambios en la concentración de contaminantes, primarios y secundarios del aire, con afectaciones a la salud. Por otra parte, estudios toxicológicos de laboratorio han sustentado la casualidad de la mayoría de estas relaciones, demostrando los efectos nocivos de contaminantes en cultivos celulares y animales de laboratorio. Incremento en enfermedades cardiovasculares y respiratorias, en mortalidad, en el uso de servicios médicos y en días de productividad perdidos son algunos de los efectos que se han asociado a la contaminación del aire.

Ante este panorama resulta de vital importancia la toma de decisiones en materia de política pública y la formulación de estrategias orientadas a la protección de la población contra los efectos dañinos de la contaminación. Para facilitar este proceso de toma de decisiones, el establecimiento de normas de calidad del aire y la evaluación de la eficiencia de las acciones emprendidas, requieren de la vigilancia sistemática del estado que guardan las concentraciones de los contaminantes del aire en los principales centros urbanos del país. De esta forma el monitoreo de la calidad del aire permitirá no sólo evaluar la distribución espacial y temporal de los contaminantes sino el estudio de las tendencias de los mismos.

Es ineludible la responsabilidad de pasar de las palabras a los hechos, Costa Rica cuenta, en materia de calidad del aire, con información derivada del monitoreo de

contaminantes e inventarios de emisiones que puede permitir el desarrollo de planes para la mejora sostenida de este recurso.

El presente documento muestra los resultados del monitoreo de la calidad del aire realizado durante el año 2012. Todas las instituciones involucradas en la comisión para mejorar la calidad del aire del Área Metropolitana del país, esperan que este documento sea un insumo orientador así como un punto de partida para iniciar el encausamiento de medidas tendientes a revertir el estado que guarda la calidad del aire en esta región de Costa Rica.

Dr. Jorge Herrera Murillo
UNIVERSIDAD NACIONAL

Índice

Presentación	03
Índice	05
Glosario	06
Monitoreo de la Calidad del Aire	09
Contaminantes monitoreados: Resultados año 2012	14
Partículas Suspendidas	14
Dióxido de Nitrógeno	23
Depositación Total	24
Conclusiones	29
Bibliografía	30

Glosario

Aerosol	Partícula pequeña, sólida o líquida (y mezcla de ellas), de diversa composición química, suspendida en la atmósfera. Tienden a tener relaciones sinérgicas con contaminantes.
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 de sodio, sales de magnesio, calcio, potasio y sulfatos)
Biomasa	Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. Por ejemplo, leña, carbón, gas metano, residuos agrícolas, paja, etc.
Broncoconstricción	Estrechamiento de las vías aéreas que provoca la disminución o bloqueo del flujo de aire
Bronquiolos	En los pulmones, son las pequeñas vías aéreas en las que se dividen los bronquios y conducen hacia los alvéolos
Carboxihemoglobina	Es un complejo estable que se forma de la combinación de la hemoglobina con el monóxido de carbono. Su presencia en la sangre inhibe la función de transporte de oxígeno.
Contaminación atmosférica	Presencia de contaminantes en la atmósfera, tales como polvo, gases o humo en cantidades y durante períodos de tiempo tales que resultan dañinos para los seres humanos, la vida silvestre y la propiedad. Estos contaminantes pueden ser de origen natural o producidos por el hombre directa o indirectamente.
Contaminante	Todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la

	población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.
Contaminante Primario	Contaminante producido directamente por la actividad humana o la naturaleza.
Contaminante Secundario	Contaminante producido a partir de algún(os) contaminante(s) primario(s) y otras sustancias.
Efectos agudos	Se refiere a los efectos en la salud provocados por la exposición de corta duración a altas concentraciones de un contaminante
Efectos crónicos	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
Exposición	Está determinada por la cantidad de contaminante que estuvo en contacto con una persona, población o medio y el tiempo que dicho contaminante actúa directamente sobre esa persona. Algunos de los agentes contaminantes presentan un comportamiento acumulativo, por lo tanto, mientras más tiempo permanezcan en un medio, el daño que causan se va acumulando o es mayor, como por ejemplo los rayos UV sobre la piel.
Material Particulado	Es una mezcla de partículas líquidas, sólidas o líquidas y sólidas suspendidas en el aire que difieren en tamaño, composición y origen. El tamaño de las partículas suspendidas en la atmósfera varía en más de cuatro órdenes de magnitud, desde unos pocos nanómetros a decenas de micrómetros. El material particulado conviene clasificarlo por sus propiedades aerodinámicas (Diámetro Aerodinámico), dado que éstas son un factor decisivo para el transporte y la remoción de las partículas desde el aire. También, son determinantes para la depositación en el sistema respiratorio y están asociadas con la composición química y las fuentes de esas partículas, cuando se habla del tamaño de una partícula, se está hablando de su diámetro aerodinámico.
Metales tóxicos	Elementos químicos del grupo de los metales que poseen cierta toxicidad y es común referirse a ellos con el término genérico de

“metales pesados”. Los más conocidos son el mercurio, el plomo, el cadmio y el talio

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.
Toxicidad	Potencial o capacidad inherente de un material para causar efectos adversos en un organismo vivo

Monitoreo de la calidad del Aire:

La contaminación del aire se origina cuando se encuentran presentes en él contaminantes que no son posibles de encontrar en un estado natural o cuando alguno de los compuestos contenidos en la atmósfera naturalmente presenta concentraciones mayores a las esperadas sin la influencia antropogénica.

En este sentido se define como contaminante del aire al compuesto o compuestos que alteran nocivamente la concentración normal del aire ambiente y la calidad del aire como el estado de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos en un periodo de tiempo y lugar determinados (INECC, 2010).

Los contaminantes del aire pueden ser originados tanto a partir de fuentes naturales (descomposición de materia orgánica, erosión del suelo, procesos volcánicos, incendios forestales, etc) como antropogénicas (quema de combustibles fósiles). Las fuentes emisoras generadas por la acción del hombre contemplan una amplia gama que incluye desde fuentes fijas (establecimientos industriales y comerciales estacionarios), fuentes de área (conjunto de pequeños establecimientos estacionarios) y fuentes móviles.

Los contaminantes que son emitidos de manera directa, ya sea de una fuente natural o antropogénica, son llamados contaminantes primarios (por ejemplo, el monóxido de carbono y el dióxido de

nitrógeno). También existen los llamados contaminantes secundarios, los cuales son resultado de las reacciones químicas entre contaminantes primarios y otros componentes del aire (por ejemplo el ozono, que se forma de la reacción entre el dióxido de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles).

En el aire pueden existir numerosos compuestos tanto primarios como secundarios sin embargo, 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), el plomo (Pb), las partículas suspendidas totales (PST), y las partículas suspendidas menores a 10 y a 2,5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Dichos contaminantes no solo causan afectaciones a la salud, sino también a los ecosistemas y el clima (cuadro 1).

Debido a lo anterior es fundamental, realizar mediciones de forma continua para observar los cambios en las concentraciones de estos contaminantes con el tiempo y el espacio. Producto de esta la labor de vigilancia surge el monitoreo de la calidad del aire, el cual se define como el conjunto de metodologías diseñadas para muestrear, analizar y procesar en forma continua y sistemática las concentraciones de sustancias o de contaminantes presentes en el aire.

Cuadro 1. Contaminantes criterio y sus efectos más importantes a la salud, ecosistemas y el clima

Contaminante	Efectos a la Salud	Efectos Ambientales	Efectos Climáticos
Partículas (PM)	Pueden causar o agravar enfermedades cardiovasculares y pulmonares, afectar el sistema nervioso central, sistema reproductivo y provocar cáncer. Como resultado muerte prematura.	Afectan a los animales de forma similar que a los humanos. Afectan el crecimiento de plantas y procesos en ecosistemas. Pueden causar daños a edificios y visibilidad reducida.	Los efectos en el clima varían dependiendo del tamaño de partícula y su composición: algunas pueden enfriar otras calentar. Afectan los patrones de lluvias. Su deposición cambia el albedo superficial.
Óxidos de Nitrógeno	El NO ₂ puede afectar el hígado, pulmón, bazo y sangre. Pueden agravar enfermedades pulmonares causando males respiratorios y aumentando la susceptibilidad a infecciones.	Contribuyen a la acidificación y eutrofización del suelo y el agua, provocando cambios en la diversidad de especies. Es un precursor de O ₃ y PM. Puede dañar edificios.	Contribuye a la formación de O ₃ y PM, efectos climáticos asociados.
Monóxido de Carbono	Provoca enfermedades del corazón y daños al sistema nervioso y causar dolor de cabeza, mareos y fatiga.	Pueden afectar a los humanos de forma similar que a los humanos.	Contribuye a la formación de GEI como CO ₂ y O ₃ .
Plomo	Afecta casi a cada órgano y sistema del cuerpo, especialmente el nervioso. Puede causar nacimientos prematuros, desarrollo mental disminuido y crecimiento reducido.	Se bioacumula e impacta adversamente tanto a sistemas terrestres como acuáticos. En la vida animal incluyen problemas reproductivos y cambios en la apariencia o comportamiento.	Sin efectos específicos.
Óxidos de Azufre (SO_x)	Agrava el asma y puede reducir la función pulmonar e inflamar el tracto respiratorio. Puede causar dolor de cabeza, malestar general y ansiedad.	Contribuye a la acidificación del suelo y aguas superficiales. Causa daños a la vegetación y pérdidas de especies locales en sistemas acuáticos y terrestres. Contribuye a la formación de PM con efectos ambientales asociados. Daños a edificios.	Contribuye a la formación de partículas con sulfato, enfriando la atmósfera.
Ozono	Puede disminuir la función pulmonar, agravar el asma y otras enfermedades pulmonares. Puede provocar mortalidad prematura.	Daños a la vegetación, afectar la reproducción de plantas y su crecimiento, además de disminuir el rendimiento de las cosechas. Puede alterar la estructura del ecosistema, reducir la biodiversidad y disminuir la absorción de CO ₂ .	El ozono superficial es un GEI que contribuye al calentamiento de la atmósfera.

El monitoreo sirve de herramienta para la identificación y evaluación de problemas de la calidad del aire (OMS, 2000). El monitoreo, junto con los modelos de predicción y los inventarios de emisiones, son parte integral de la gestión de la calidad del aire. Ésta se encuentra directamente vinculada con el cumplimiento de objetivos económicos, de evaluación y de regulación. En el desarrollo de un plan efectivo de gestión de la calidad del aire es necesario contar con información confiable relacionada con los niveles de contaminación en el aire a través del monitoreo.

El monitoreo de calidad del aire se realiza a través de estaciones. Una **estación de monitoreo** consiste en una caseta que contiene, como se mencionó, diversos equipos, como analizadores automáticos, monitores, sensores meteorológicos, entre otros, destinados a monitorear las concentraciones de uno o más contaminantes del aire y, por lo general, algunos parámetros meteorológicos; con la finalidad de evaluar la calidad del aire en un área determinada. Los criterios de ubicación de las estaciones son diferentes según los objetivos de monitoreo que hayan sido establecidos. Se denomina **red de monitoreo** al conjunto de dos o más estaciones de monitoreo. Es común que las estaciones de monitoreo se encuentren agrupadas en redes que puedan cubrir grandes extensiones geográficas.

Un **sistema de medición de la calidad del aire** es el conjunto organizado de recursos humanos, técnicos y administrativos empleados para observar el comportamiento de la ca-

lidad del aire a través del tiempo en una región dada. Este sistema debe responder en forma eficiente y confiable a los objetivos del monitoreo y/o muestreo y a las necesidades de información establecidas en materia de calidad del aire (Martínez, 1996).

Tanto a nivel nacional como internacional (cuadro 2), se han desarrollado normas de calidad del aire, donde se establecen los límites de concentración de contaminantes, con el objetivo de proteger la salud de la población. Un sistema de medición de la calidad del aire genera datos de la concentración de los contaminantes en el aire, lo que permite determinar si se están rebasando o no los estándares de la calidad del aire (Martínez, 1996; USEPA, 2008).

De igual manera, se han desarrollado procedimientos estándar de medición de la concentración de contaminantes. El cumplimiento de estos procedimientos debe ser riguroso para asegurar que se están siguiendo metodologías comprobadas y que los datos generados con estas metodologías son válidos.

Adicionalmente a la normatividad ambiental y de los procesos de medición, existen normas de procedimientos de control y aseguramiento de calidad, las cuales se recomienda se apliquen para asegurar la calidad de los datos generados por el sistema de medición de calidad del aire. Estos procedimientos van desde el mantenimiento y calibración de los equipos, hasta el manejo y análisis de los datos generados.

Cuadro 2. Límites máximos para contaminantes del aire establecidos en normativa tanto nacional como internacional.

Contaminantes	Norma Nacional Decreto 30221-S		Norma USEPA		Norma Europea		Criterio OMS	
Partículas PM₁₀	24 horas: 150 µg/m ³		24 horas: 150 µg/m ³		24 horas: 50 µg/m ³		24 horas: 50 µg/m ³	
	Promedio Anual: 50 µg/m ³		Promedio Anual: 50 µg/m ³		Promedio Anual: 40 µg/m ³		Promedio Anual: 20 µg/m ³	
Partículas PM_{2,5}	No están normadas		24 horas: 35 µg/m ³		Promedio Anual: 25 µg/m ³		24 horas: 25 µg/m ³	
			Promedio Anual: 15 µg/m ³				Promedio Anual: 10 µg/m ³	
Dióxido de Nitrógeno NO₂	1 hora: 400 µg/m ³				1 hora: 200 µg/m ³		1 hora: 200 µg/m ³	
	Promedio Anual: 100 µg/m ³		Promedio Anual: 100 µg/m ³		Promedio Anual: 40 µg/m ³		Promedio Anual: 40 µg/m ³	
Dióxido de Azufre SO₂	24 horas: 365 µg/m ³		24 horas: 365 µg/m ³		1 hora: 350 µg/m ³		10 minutos: 500 µg/m ³	
	Promedio Anual: 80 µg/m ³		Promedio Anual: 80 µg/m ³		24 horas: 125 µg/m ³		24 horas: 20 µg/m ³	
Monóxido de Carbono	1 hora: 40 mg/m ³		1 hora: 40 mg/m ³		8 horas: 10 mg/m ³		1 hora: 30 mg/m ³	
	8 horas: 10 mg/m ³		8 horas: 10 mg/m ³				8 horas: 10 mg/m ³	
Ozono	1 hora: 160 µg/m ³		1 hora: 235 µg/m ³		8 horas: 120 µg/m ³		8 horas: 120 µg/m ³	
			8 horas: 160 µg/m ³					
Plomo	Promedio Anual: 0,5 µg/m ³		Promedio Anual: 0,15 µg/m ³		Promedio Anual: 0,5 µg/m ³		Promedio Anual: 0,5 µg/m ³	

Con base en las mediciones que se realizan sobre la calidad del aire se pueden diseñar e implementar medidas para mejorarla. Sólo teniendo pleno conocimiento de qué es lo que se quiere mejorar, se pueden realizar acciones para lograrlo.

En términos de las normas de calidad del aire y su cumplimiento, la información en calidad y en cantidad adecuada obtenida observando estrictamente los procedimientos operativos, será de gran utilidad para desarrollar las capacidades que permitan comparar la información de la calidad del aire, correspondiente a periodos de tiempo definidos, que conjuntamente con los datos meteorológicos de una zona en particular permitirá evaluar con certeza la efectividad de las medidas y acciones aplicadas (INECC, 2010).

Para evaluar la efectividad de las estrategias de control, es necesario realizar mediciones antes, durante y después de su implementación. De esta manera es posible saber si la o las estrategias cumplieron con su propósito, y si deben conservarse, reforzarse o rediseñarse.

A partir de las mediciones realizadas como parte del monitoreo de calidad del aire se pueden analizar las tendencias registradas por los contaminantes. Se entiende como **tendencia** a la detección de los cambios/directrices en el tiempo de la calidad del aire como consecuencia de la actividad urbana y/o industrial. Para este propósito, una red de medición de la calidad del aire pudiera ser suficiente, midiendo o colectando muestras, por periodos relativamente prolongados dentro de un área urbana. La selección de los sitios

de medición debe hacerse cuidadosamente para evitar que queden bajo la influencia de fuentes cercanas de emisión.

Debido a las notorias variaciones temporales de las concentraciones de algunos contaminantes, siempre es importante que durante el estudio de tendencias se asegure que las mediciones sean realizadas ininterrumpidamente a lo largo del año. Los cambios en los patrones del clima que se dan de una estación a otra y de un año a otro pueden afectar las medias anuales, por lo que se requieren datos de cuando menos cinco años consecutivos para observar las tendencias fundamentales.

La exposición a contaminantes del aire puede causar efectos agudos (corto plazo) y crónicos (largo plazo) en la salud. Usualmente, los efectos agudos son inmediatos y reversibles cuando cesa la exposición al contaminante. Los efectos agudos más comunes son la irritación de los ojos, dolor de cabeza y náuseas (CEPIS, 2009).

En el caso de los efectos agudos, es sustancial contar al menos con mediciones horarias de los contaminantes, de tal manera que puedan reflejar concentraciones pico durante el ciclo diario. Por ello es necesario realizar mediciones precisas y exactas en intervalos más cortos de tiempo.

En cuanto a los efectos crónicos, los promedios anuales de concentración de contaminantes pueden ser suficientes (INECC, 2010).

CONTAMINANTES MONITOREADOS: Resultados Año 2012

Partículas Suspendidas

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.

Origen de las partículas:

Natural: la polinización de las plantas, procesos geológicos, aerosol marino, polvo de suelo e incendios forestales).

Antropogénico: quema de combustibles fósiles, procesos abrasivos, molienda de materiales, demoliciones, excavaciones, arado de terrenos, circulación de vehículos por caminos pavimentados y no pavimentados, quema de residuos a cielo abierto, aplicación de productos en spray, etc.

El estudio y la regulación ambiental de las partículas empezaron centrándose en las suspendidas totales (PST), las cuales poseen diámetros aerodinámicos menores de 100 μm .

Posteriormente, se inició el monitoreo de aquellas con diámetros menores de 10 μm (PM_{10}), y actualmente, se incluyen las partículas finas y ultra finas, es decir, las menores de 2,5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) y 1 μm (PM_1), respectivamente. En los Estados Unidos la regulación de las PST empezó en 1971, agregando normas para PM_{10} en 1987 y para $\text{PM}_{2.5}$ en 1997 (USEPA, 2006).

Entre más pequeñas sean las partículas pueden penetrar directamente hasta el interior de los pulmones con posibles efectos tóxicos debido a sus inherentes características fisicoquímicas. En varios estudios, llevados a cabo en Estados Unidos y en Europa, se ha encontrado que la exposición prolongada a partículas finas provenientes de la combustión es un factor importante de riesgo ambiental en casos de mortalidad por cáncer pulmonar y enfermedades cardiopulmonares (Pope et al., 2002).

Las partículas atmosféricas pueden tener su origen tanto en las emisiones de fuentes naturales como antropogénicas. Cuando las partículas son emitidas de una fuente (natural o antropogénica) directamente a la atmósfera son llamadas primarias. Ejemplos de esto son las partículas provenientes de tormentas de polvo, erupciones volcánicas, vegetación, humos de la quema de bosques y pastizales (Kondratyev et al, 2006), quema de combustibles fósiles, y de las construcciones. Por otra parte, las

partículas conocidas como secundarias son las que se forman en la atmósfera a través de reacciones subsecuentes entre los gases emitidos por las fuentes, tales como:

- Conversión de gases y condensación de vapores generados a temperaturas altas (por ejemplo erupciones volcánicas y de los procesos industriales).

- Reacciones de gases disueltos, libres o adsorbidos que forman productos de baja presión de vapor (por ejemplo, la oxidación de SO_2 a H_2SO_4) las cuales pueden originar partículas nuevas (Pueschel, 1995).

- Reacciones de gases en la superficie de partículas existentes para formar productos en la fase condensada (por ejemplo, la reacción del HNO_3 gaseoso con partículas de sales del mar para formar NaNO_3) modificando la composición química de las partículas existentes.

- Reacciones químicas en la fase acuosa, en nieblas, nubes o partículas de aerosol, por ejemplo oxidación de SO_2 a sulfatos (Finlaynson-Pitts y Pitts, 2000).

La formación de partículas secundarias puede ocurrir bajo condiciones de emisiones de gases de diferentes fuentes y que se han mezclado y envejecido; y cuando los contaminantes generados en días previos se acumulan o son reciclados por los vientos (Vega et al., 2002).

Las partículas transportadas por el aire tienden a desplazarse de diferente

manera de acuerdo con su tamaño. Las más grandes quedan sujetas a la fuerza gravitacional caracterizada por una velocidad de sedimentación. Las partículas más pequeñas pueden permanecer en suspensión por largos períodos (días o semanas) y ser transportadas cientos de kilómetros desde donde fueron formadas (Finlaynson-Pitts y Pitts, 2000). Existen dos tipos de depositación de las partículas:

Depositación seca, proceso donde en ausencia de precipitación pluvial, tanto los gases como las partículas son transportados por el viento a la superficie de la Tierra. La remoción por este procedimiento, depende de la afinidad entre la partícula y el material de la superficie (suelo, agua, vegetación, etc), de su tamaño y de las condiciones atmosféricas. La depositación por gravedad también contribuye a la remoción de las partículas, sobre todo de aquellas con diámetros mayores a $10\ \mu\text{m}$.

Depositación húmeda, proceso por el cual, partículas atmosféricas son depuradas por reacciones químicas en las nubes o bien por su absorción en las gotas de agua, que dependen de la solubilidad del gas en éstas y de la presencia de otras sustancias en la solución.

Las partículas finas son depuradas principalmente en las nubes al actuar como núcleos de condensación de agua, pero también pueden ser removidas por procesos como: lluvia, niebla, etc; estos procesos son más importantes para las partículas gruesas que para las finas, ya que estas últimas tienden a seguir el movimientos del aire.

En el cuadro 3 se muestran los resultados obtenidos como promedio anual para los 13 sitios de monitoreo de partículas PM_{10} en el Área Metropolitana de Costa Rica. Tal como se puede observar en las áreas industriales y comerciales de alto flujo vehicular (BE-01, HE-01, SJ-04) se presentan concentraciones significativamente superiores ($42 - 27 \mu g/m^3$) a las registradas para zonas residenciales y comerciales de bajo flujo vehicular ($15 - 23 \mu g/m^3$). Durante el año 2012 todos los sitios de monitoreo ubicados en el Área Metropolitana cumplieron tanto el límite de exposición aguda de $150 \mu g/m^3$ como

el valor de exposición crónica de $50 \mu g/m^3$ contemplados en el decreto 30221-S “Reglamento de Inmisión de Contaminantes de Costa Rica”. En cuanto a la normativa internacional, las concentraciones superan el criterio emitido por la Organización Mundial de la Salud, con excepción de MO-01 y SD-01. Las mayores concentraciones de partículas PM_{10} en el Área Metropolitana se registraron durante los meses de agosto y setiembre (figura 1), en donde por ejemplo para el sitio de la Catedral Metropolitana se registraron promedios mensuales de hasta $47 \mu g/m^3$.

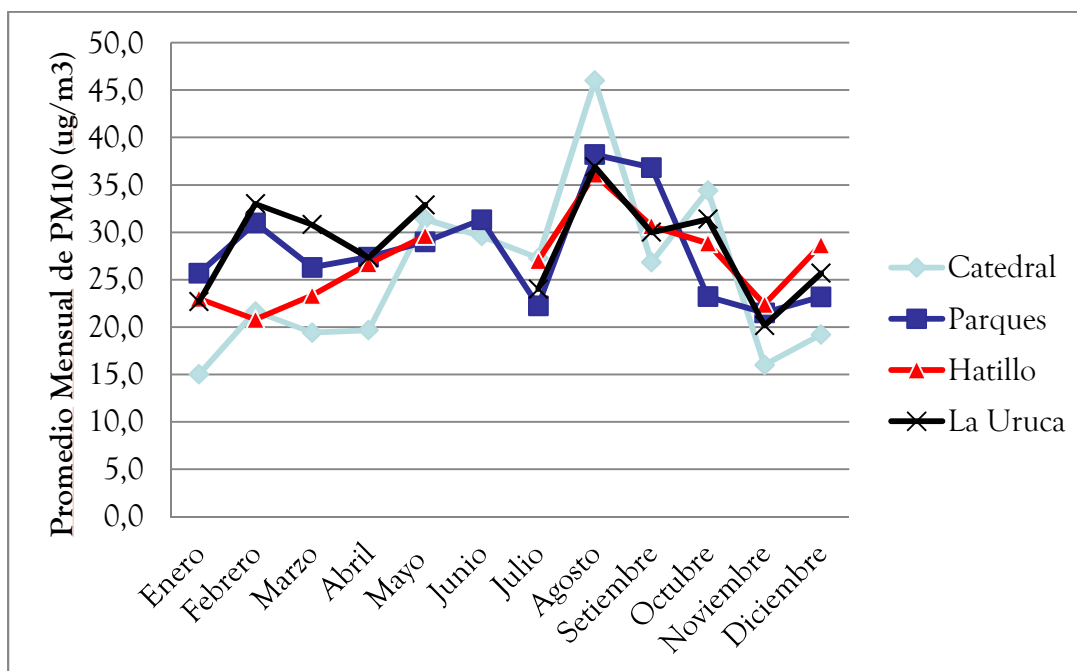


Figura 2. Evolución de los promedios mensuales de partículas PM_{10} registrados en los sitios de monitoreo del cantón de San José, año 2012

Cuadro 3. Concentración promedio anual de partículas PM₁₀ (µg/m³) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2012.

Sitio de muestreo	Promedio Anual (µg/m ³)	Desviación Estándar (µg/m ³)	Valor máximo registrado en 24 horas
Catedral Metropolitana (SJ-01)	27	15	117
Sección de Parques MSJ (SJ-02)	29	12	124
Centro de Reciclaje de Hatillo MSJ (SJ-03)	27	7	45
La Uruca (SJ-04)	29	8	50
Registro Nacional, Zapote (SJ-05)	22	6	38
Palacio Municipal Escazú (ES-01)	23	6	38
Rectoría de la UNA, Heredia (HE-01)	42	15	84
Centro Comercial La Ribera (BE-01)	32	12	86
Lindora, Santa Ana (SA-01)	22	7	43
Universidad Técnica Nacional, Alajuela (AL-01)	22	6	36
Zona Industrial, Cartago (CA-01)	25	8	56
Compañía EATON, Moravia (MO-01)	15	7	37
Santo Domingo (SD-01)	18	6	39

Cuadro 4. Evolución de los promedios anuales de partículas PM₁₀ (µg/m³) obtenidas en el Área Metropolitana de Costa Rica (2008-2012).

Sitio de muestreo	2008	2009	2010	2011	2012	Sitio de muestreo	2008	2009	2010	2011	2012
SJ-01	29	27	28	24	27	MO-01			20	20	15
SJ-02			-	26	29	HE-01			56	45	42
SJ-03			35	32	27	BE-01	41	38	34	33	32
SJ-04			37	32	29	BE-02			52	54	-
SJ-05			29	22	22	SD-01			22	21	18
ES-01			22	23	23	CA-01			28	28	25
SA-01			26	26	22	AL-01			25	26	22

Como resultado importante, se puede mencionar que durante el año 2012, los sitios ubicados en Catedral Metropolitana y la Sección de Parques de la Municipalidad de San José (cuadro 4) revertieron la tendencia a la baja que se venía registrando en años anteriores (2008-2011), mientras únicamente los sitios SJ-03, SJ-04, SA-01, MO-01 y AL-01 presentaron una disminución significativa con respecto al año 2011. En los cuadros 5 y 6 se presentan los valores medios y la desviación estándar de la concentración de los componentes mayores y traza analizados en las muestras de PM_{10} colectadas en las estaciones del Área Metropolitana de Costa Rica.

En promedio se ha podido determinar el 85% de la masa total de PM_{10} , a partir del conjunto de componentes analizados y de aquellos obtenidos con las relaciones estequiométricas. Parte de la masa no determinada podría atribuirse a un cierto contenido de agua que, o bien forma parte de la composición de las partículas, o bien ha sido absorbida por las mismas, y otra parte a elementos formadores del material orgánico no determinados (como azufre, hidrógeno y nitrógeno).

En las muestras de PM_{10} el componente más abundante ha sido el sulfato no marino, $nm\ SO_4^{2-}$, de naturaleza mayoritariamente antrópica, el nitrato, NO_3^- y el amonio. Estos valores indican el carácter antrópico del material particulado atmosférico registrado en las estaciones de monitoreo.

La suma del conjunto de elementos traza analizados ha alcanzado únicamente un valor medio de $0,8\ \mu g/m^3$. Los elementos traza más abundantes son Cu, Mn y Cr encontrándose éstos en un rango de entre 4,5 y $328\ ng/m^3$. Del

conjunto de elementos traza el único que posee legislación específica en Costa Rica es el plomo (Pb), para el que se ha establecido un límite anual de $500\ ng/m^3$. A nivel internacional la Directiva europea 2004/107/CE contempla un valor objetivo para níquel (Ni) ($20\ ng/m^3$). Los niveles medios de estos elementos detectados en la fracción PM_{10} del Área Metropolitana de Costa Rica han sido de $5,4\ ng/m^3$ de Pb y de $3,2\ ng/m^3$ para el Ni, todos ellos por debajo de los valores límite y objetivo indicados.

El Mn ($136\ ng/m^3$ concentración media anual para las 13 estaciones) supera los valores sugeridos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, $150\ ng/m^3$) en las estaciones HE-01, BE-01, AL-01 y CA-01. Dentro de este análisis merece especial atención el caso del Mn, ya que para al menos el 80% de las estaciones de monitoreo se presentan incrementos importantes en la concentración de este elemento con respecto al año 2011, tal es el caso de las estaciones AL-01 (2011:140, 2012: $328\ ng/m^3$), ES-01 (2011: 94, 2012: $126\ ng/m^3$), CA-01 (2011: 102, 2012: $290\ ng/m^3$), HE-01(2011: 78, 2012: $215\ ng/m^3$), SJ-01(2011: 20, 2012: $46\ ng/m^3$) y SJ-04(2011: 27, 2012: $65\ ng/m^3$).

Por último la Guía de calidad del aire de la OMS propone un valor límite diario de $1000\ ng/m^3$ de V que no debería de superarse nunca, el cual tampoco se supera en las estación de estudio.

Para estimar la cantidad de SO_4^{2-} y NO_3^- neutralizado por NH_4^+ en cada muestra de material particulado obtenida se ha realizado un análisis basado en el balance iónico entre los neq/m^3 existentes de estos componentes en las distintas muestras obtenidas.

Cuadro 5. Composición iónica de las partículas PM₁₀ colectadas en el Área Metropolitana de Costa Rica, Año 2012.

Sitio de muestreo	F ⁻ (µg/m ³)	Cl ⁻ (µg/m ³)	NO ₂ ⁻ (µg/m ³)	Br ⁻ (µg/m ³)	NO ₃ ⁻ (µg/m ³)	PO ₄ ³⁻ (µg/m ³)	SO ₄ ²⁻ (µg/m ³)	Formiato (µg/m ³)	Oxalato (µg/m ³)
SJ-01	0,46 (0,20)	1,21 (0,66)	0,30 (0,10)	0,28 (0,05)	0,94 (0,37)	1,06 (0,42)	5,03 (3,26)	0,46 (0,43)	0,35 (0,11)
SJ-02	0,39 (0,13)	1,20 (0,71)	0,35 (0,20)	0,29 (0,05)	0,83 (0,29)	0,81 (0,39)	3,97 (2,26)	0,40 (0,35)	0,38 (0,13)
SJ-03	0,39 (0,18)	1,14 (0,73)	0,28 (0,06)	0,29 (0,06)	0,70 (0,31)	0,86 (0,39)	3,64 (2,00)	0,35 (0,34)	0,34 (0,10)
SJ-04	0,41 (0,23)	0,78 (0,45)	0,28 (0,05)	0,51 (0,08)	0,53 (0,32)	1,00 (0,58)	2,28 (1,25)	0,26 (0,19)	0,84 (0,61)
SJ-05	0,36 (0,19)	0,95 (0,49)	0,38 (0,72)	0,37 (0,13)	0,56 (0,53)	1,01 (0,43)	3,33 (3,08)	0,36 (0,83)	0,31 (0,08)
ES-01	0,42 (0,21)	1,30 (0,75)	0,28 (0,06)	0,28 (0,04)	0,76 (0,32)	1,09 (0,48)	2,78 (1,55)	0,45 (0,47)	0,36 (0,11)
SA-01	0,23 (0,16)	1,28 (0,74)	0,24 (0,04)	0,27 (0,03)	0,76 (0,39)	1,08 (0,55)	2,85 (1,68)	0,26 (0,22)	0,23 (0,05)
MO-01	0,18 (0,10)	1,37 (0,85)	0,27 (0,08)	0,29 (0,03)	0,66 (0,30)	1,12 (0,51)	2,40 (1,27)	0,40 (0,29)	0,22 (0,05)
HE-01	0,20 (0,13)	1,29 (0,76)	0,27 (0,09)	0,27 (0,06)	0,82 (0,38)	1,08 (0,50)	3,11 (2,74)	0,30 (0,23)	0,21 (0,06)
BE-01	0,32 (0,15)	1,26 (0,69)	0,27 (0,06)	0,27 (0,08)	0,74 (0,36)	1,01 (0,39)	2,31 (0,75)	0,29 (0,28)	0,35 (0,11)
SD-01	0,18 (0,10)	1,63 (0,87)	0,25 (0,06)	0,26 (0,03)	0,81 (0,20)	1,06 (0,55)	2,59 (1,55)	0,36 (0,47)	0,21 (0,05)
AL-01	0,19 (0,16)	1,34 (0,69)	0,24 (0,04)	0,28 (0,03)	0,88 (0,41)	1,14 (0,82)	3,82 (2,74)	0,41 (0,80)	0,20 (0,05)
CA-01	0,20 (0,13)	1,22 (0,67)	0,27 (0,08)	0,28 (0,03)	0,68 (0,32)	1,05 (0,48)	2,12 (1,15)	0,38 (0,25)	0,23 (0,06)

El valor entre paréntesis representa la desviación estándar del dato

Cuadro 6. Concentración de metales presentes en las partículas PM₁₀ colectadas en el Área Metropolitana de Costa Rica, Año 2012.

Sitio de muestreo	Cobre (ng/m ³)	Vanadio (ng/m ³)	Níquel (ng/m ³)	Plomo (ng/m ³)	Manganeso (ng/m ³)	Aluminio (ng/m ³)	Hierro (μg/m ³)	Calcio (μg/m ³)	Sodio (μg/m ³)	Potasio (μg/m ³)	Magnesio (μg/m ³)	Cromo (ng/m ³)
SJ-01	14 (7,7)	4,0 (2,0)	3,0 (1,4)	3,8 (1,9)	46 (7,0)	284 (159)	38,4 (85)	0,29 (0,13)	2,3 (1,1)	0,17 (0,25)	0,22 (0,65)	21 (13)
SJ-02	28 (29)	2,7 (1,0)	2,5 (1,8)	9,3 (4,4)	63 (35)	284 (142)	189 (104)	0,28 (0,06)	2,4 (1,9)	0,16 (0,12)	0,11 (0,14)	11 (1,3)
SJ-03	21 (28)	6,2 (2,1)	3,0 (2,0)	4,2 (1,8)	73 (31)	92 (42)	251 (91)	0,46 (0,18)	1,4 (0,6)	0,09 (0,04)	0,12 (0,06)	10 (1,5)
SJ-04	31 (11)	10,3 (6,2)	4,6 (2,0)	4,2 (2,6)	65 (39)	112 (60)	240 (144)	0,30 (0,05)	1,5 (0,4)	0,11 (0,06)	0,11 (0,04)	10 (1,9)
SJ-05	103 (59)	4,7 (1,4)	2,4 (0,9)	6,2 (3,6)	88 (42)	89 (89)	69 (45)	0,25 (0,06)	1,6 (0,6)	0,24 (0,07)	0,099 (0,024)	8,1 (1,3)
ES-01	126 (77)	2,4 (0,9)	1,6 (0,6)	2,5 (0,9)	126 (58)	289 (100)	121 (80)	0,22 (0,05)	1,4 (0,5)	0,44 (0,04)	0,105 (0,050)	6,5 (6,9)
SA-01	18 (9)	2,4 (1,0)	2,5 (1,0)	4,3 (1,4)	100 (80)	333 (187)	224 (97)	0,18 (0,05)	1,5 (0,5)	0,38 (0,09)	0,12 (0,05)	23 (27)
MO-01	15 (7)	2,5 (1,3)	2,8 (1,3)	3,5 (1,1)	37 (54)	487 (121)	397 (95)	0,22 (0,06)	1,3 (0,4)	0,37 (0,09)	0,17 (0,05)	4,5 (1,7)
HE-01	81 (24)	5,5 (5,8)	3,3 (2,5)	7,0 (1,5)	215 (354)	605 (108)	477 (102)	0,31 (0,08)	2,1 (0,5)	0,42 (0,09)	0,23 (0,05)	25 (16)
BE-01	56 (39)	7,1 (5,8)	3,9 (3,6)	6,7 (1,5)	270 (354)	543 (132)	404 (161)	0,25 (0,06)	1,7 (0,5)	0,49 (0,07)	0,12 (0,04)	5,8 (1,3)
SD-01	18 (5,4)	3,7 (2,0)	2,7 (1,1)	4,1 (1,5)	135 (11)	295 (71)	188 (71)	0,27 (0,11)	1,9 (0,9)	0,23 (0,09)	0,23 (0,45)	7,9 (8,6)
AL-01	67 (24)	6,4 (3,9)	4,1 (3,2)	7,3 (2,5)	328 (190)	487 (151)	381 (129)	0,31 (0,07)	1,5 (0,6)	0,41 (0,08)	0,14 (0,05)	16 (5)
CA-01	75 (28)	7,3 (4,6)	4,9 (3,0)	7,8 (1,7)	290 (87)	505 (145)	395 (107)	0,33 (0,09)	1,2 (0,7)	0,28 (0,05)	0,14 (0,06)	20 (8)

El valor entre paréntesis representa la desviación estándar del dato

En el cuadro 7 se observa que existe un déficit de NH_4^+ , ya que los factores de correlación presentan valores no cercanos a uno lo que indica que gran parte de las especies ácidas, sobre todo el SO_4^{2-} y NO_3^- , han debido estar asociadas a otros cationes o bien han debido de existir como especies ácidas (H_2SO_4 y HNO_3). Además del $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ y NH_4NO_3 (especies dominantes), en la fracción de PM_{10} los compuestos sulfatados y nitratados más comunes son el Na_2SO_4 , el NaNO_3 , el $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, el CaSO_4 y el $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, formados a través de reacciones de especies gaseosas ácidas con partículas gruesas de origen marino o mineral como NaCl , CaCO_3 o MgCO_3 (Harrison y Kitto, 1990). Estas reacciones dependerán en gran medida de la disponibilidad de los aniones y de la humedad relativa. Adicionalmente, en el cuadro 7 se presentan los resultados del balance iónico entre Na^+ y Cl^- para todas las muestras colectadas en cada uno de los sitios de monitoreo. Los resultados evidencian que ha existido un déficit de Cl^- respecto a Na^+ por lo que se descarta la presencia de Cl^- antropogénico. Como se ha comentado, la presencia de estos iones en el material particulado (preferentemente en las muestras de PM_{10}) es atribuible generalmente a las emisiones marinas de NaCl , aunque pueden detectarse contribuciones antropogénicas, sobre todo en el caso del Cl^- . El déficit de Cl^- respecto al Na^+ está relacionado con la reacción entre HNO_3 y NaCl que genera la formación de NaNO_3 y la pérdida de Cl^- en forma de HCl en la atmósfera. Hay que tener en cuenta que el NH_4NO_3 es una fase volátil a temperaturas relativamente elevadas, por lo que en época seca estas fases nitrogenadas

particuladas pueden no ser estables disociándose en forma de NH_3 (gas) y HNO_3 (gas) que puede interaccionar con el cloruro sódico (Seinfeld y Pandis, 1998).

Cuadro 7. Factores de correlación de Spearman para algunas de las especies químicas medidas en las partículas PM_{10} .

Sitio de muestreo	NH_4^+ vrs ($\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-$)	Na^+ vrs Cl^-
SJ-01	0,825	0,854
SJ-02	0,808	0,882
SJ-03	0,859	0,904
SJ-04	0,876	0,893
SJ-05	0,812	0,864
ES-01	0,880	0,907
SA-01	0,841	0,878
MO-01	0,795	0,965
HE-01	0,786	0,924
BE-01	0,761	0,869
SD-01	0,757	0,914
CA-01	0,862	0,871
AL-01	0,855	0,906

Contrario a lo ocurrido con las PM_{10} , las partículas con diámetros menores o iguales a $2,5 \mu m$ ($PM_{2,5}$) registran concentraciones (cuadro 8) que incumplen la normativa internacional tanto para exposición aguda como crónica, en cuatro de los cinco sitios de monitoreo ubicados en el área metropolitana: Edificio Municipalidad de San José, Compañía Nacional de Fuerza y Luz, Rectoría de la UNA en Heredia y La Asunción en Belén. Es importante aclarar que el decreto 30221-S no contempla valores criterio para este contaminante. De esta forma de cada 100 días en donde se realizó monitoreo

de la calidad del aire en los cuatro sitios antes mencionados, solamente en 83, 80, 78 y 75 días respectivamente se cumplen las normas internacionales para $PM_{2,5}$. La relación entre la concentración de partículas $PM_{2,5}$ con respecto a las PM_{10} corresponde a 0,66-0,70, esto indica que aproximadamente el 66% de las partículas PM_{10} corresponden a partículas con diámetros aerodinámicos menores o iguales a $2,5 \mu m$. Este valor es similar a 0,60 reportado por Dockery y Pope (1994) para centros urbanos en Norteamérica.

Cuadro 8. Resultados de concentración de partículas $PM_{2,5}$ registrados durante el año 2012 en el cantón de San José.

Estación	Datos Válidos	Promedio Anual ($\mu g/m^3$)	Valor Máximo registrado en 24 horas ($\mu g/m^3$)	Límites
Edificio de la Municipalidad de San José	117	27 ± 13	52	Estados Unidos Anual: $15 \mu g/m^3$ 24 horas: $35 \mu g/m^3$ OMS Anual: $10 \mu g/m^3$ 24 horas: $25 \mu g/m^3$
Sector Residencial, Moravia	95	13 ± 5	21	
La Asunción, Belén	104	35 ± 12	73	
Rectoría de la UNA, Heredia	99	31 ± 15	68	
CNFL, La Uruca	102	20 ± 11	54	

Dióxido de Nitrógeno:

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es un gas de color rojo pajizo, de olor irritante, que reacciona fácilmente con el agua para producir ácido nítrico y óxido nítrico; desempeña un papel importante en la formación de ozono y partículas secundarias.

Se produce durante la combustión a altas temperaturas en procesos industriales, la quema de combustibles fósiles y de la reacción entre el nitrógeno y oxígeno atmosféricos durante tormentas eléctricas. La exposición a altas concentraciones de este contaminante ocasiona irritación en las vías respiratorias, daño en la membrana celular del tejido pulmonar y agrava los síntomas en personas con enfermedades respiratorias crónicas. La exposición repetida a altas concentraciones puede ocasionar muerte celular en el tejido pulmonar. Los efectos del NO_2 en la salud humana se centran sobre todo en el aparato respiratorio, habiéndose observado que cuando se supera una concentración media de NO_2 de $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,1 ppm) en el 40% de los días, aumenta la frecuencia de las infecciones de las vías respiratorias.

Se ha comprobado que el NO_2 provoca daños al parénquima pulmonar, e incluso ante exposiciones crónicas a concentraciones bajas el resultado es la aparición de cambios patológicos semejantes a los del enfisema pulmonar. Adicionalmente, determina la inhibición de la depuración mucociliar, la fagocitosis y la respuesta inmunológica en el pulmón, produciendo una disminución de la resistencia del pulmón ante las

infecciones. Por último, incrementa la sensibilidad pulmonar a los broncoconstrictores, afectando, por lo tanto, especialmente a las personas asmáticas. Otros efectos son sensación de ahogo y dolor en el pecho. Los niveles bajos de óxidos de nitrógeno en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta, los pulmones, y posiblemente causar tos y una sensación de falta de aliento, cansancio y náusea. La exposición a bajos niveles también puede producir acumulación de líquido en los pulmones 1 ó 2 días después de la exposición. Respirar altos niveles de óxidos de nitrógeno puede rápidamente producir quemaduras, espasmos y dilatación de los tejidos en la garganta y las vías respiratorias superiores, reduciendo la oxigenación de los tejidos del cuerpo, produciendo acumulación de líquido en los pulmones y la muerte. El contacto con la piel o los ojos puede producir quemaduras.

Se desconoce si la exposición a dióxido de nitrógeno puede afectar la reproducción en seres humanos. Los asmáticos son especialmente sensibles a los efectos del NO_2 , se ha encontrado que el 70% de los asmáticos responden a concentraciones más bajas que las personas sanas ($90\text{-}560 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0,05-0,3 ppm) frente a mayor de $1880 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1 ppm) en personas sanas).

Para el muestreo y análisis de las concentraciones de dióxido de nitrógeno en aire se utilizó el método pasivo, el cual tiene su fundamento en los fenómenos de difusión y permeación, por los cuales las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente

a través de la masa de otro gas hasta repartirse uniformemente en su seno, así como de atravesar una membrana sólida que le presente una determinada capacidad de permeación.

En el cuadro 9 se presentan el promedio anual de las concentraciones de NO_2 obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en los cantones de San José y Belén durante el año 2012. Tal como se puede notar al menos cinco sitios en San José y cuatro en Belén presentan valores mayores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que corresponde al valor anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante. Las concentraciones mayores se presentan para sitios comerciales con alto flujo vehicular en donde se llegan a alcanzar excedencias de hasta un 45% con respecto al valor criterio de la Organización Mundial de la Salud. Si se comparan estos valores con los obtenidos para años anteriores se registra una tasa de incremento de 11 y 13% para sitios comerciales e industriales respectivamente. Es importante indicar que esta tasa aumento ligeramente con respecto a la registrada en años anteriores donde se registraban incrementos de hasta 10% para zonas comerciales de alto flujo vehicular.

Depositación Total:

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, nieve, 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 5.6, 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 ácida o lluvia ácida.

El incremento de la acidez en el 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 (US Environmental Protection Agency, 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 pérdida de nutrientes foliares y necrosis en hojas y tejidos reproductores, lo que conduce al debilitamiento de la planta, pérdida de frutos y descenso en la productividad, sin embargo, los efectos indirectos pueden ser mayores. La acidificación

Cuadro 9. Promedios anuales de dióxido de nitrógeno obtenidos en el cantón de San José y Belén durante el año 2012.

Sitio de Muestreo	Promedio Anual 2011 (ug/m ³)	Promedio Anual 2012 (ug/m ³)
Cantón de San José		
Costado Norte Hospital San Juan Dios	55	59
Costado Norte Catedral Metropolitana	43	46
Estación al Pacífico	29	31
Bomba La Castellana	42	44
Barrio Lujan, Antigua Fábrica Dos Pinos	26	28
Barrio Francisco Peralta, cercanías del edificio MINAE	26	25
Barrio La Cruz	21	23
Avenida 10 AyA	29	31
Tribunal Supremo Elecciones	19	17
Costado este Iglesia Santa Teresita	23	21
JAPDEVA	40	42
Barrio México	26	28
Barrio Pithaya	29	32
Numar	41	40
Cantón de Belén		
Antiguo Hotel Herradura	42	45
Costado sur Plaza de Deportes La Asunción	44	46

Sitio de Muestreo	Promedio Anual 2011 (ug/m ³)	Promedio Anual 2012 (ug/m ³)
Residencial Cariari	19	20
Costado Norte de la Firestone	31	36
Frente al Hotel Marriot	25	27
Frente a Iglesia católica La Ribera	24	26
Parque recreativo Ojo de Agua	28	30
Costado Norte Municipalidad de Belén	42	44
Polideportivo Belén	20	18
Cruce Belén – Santa Ana	40	40
Antigua Kimberly Clark	19	21

progresiva del suelo origina la pérdida de cationes básicos y 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 (Krupa, 1999; Larssen *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2006, US Environmental Protection Agency, 2010).

Los resultados de 2012 (cuadro 10) indican que la acidez de la lluvia presentó poca variabilidad espacial con valores promedio de pH entre 4,33 y 4,88. El valor promedio más ácido se obtuvo en la estación ubicada en La Asunción de Belén, con un pH de 4,05. A pesar de que los datos de pH indican cierta homogeneidad en la distribución de la acidez, es probable que en el suroeste de la GAM sean mayores los efectos de la lluvia ácida, ya que suele ser mayor el porcentaje de muestreos ácidos en esta zona.

Cuadro 10. Composición química de las muestras de depositación total colectadas en San José y Belén durante el año 2012.

Sitios de muestreo	pH	SO ₄ ²⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	F ⁻ mg/l	NH ₄ ⁺ mg/l	NO ₂ ⁻ mg/l
Biblioteca Nacional	4,74	2,64	0,98	0,91	0,11	0,45	0,36
Ministerio de Seguridad Pública	4,59	2,75	0,82	1,08	0,12	0,52	0,38
Sección de Parques, MSJ	4,88	2,81	0,87	1,14	0,11	0,58	0,33
Edificio del ICE, La Sabana	4,49	2,95	0,95	0,97	0,10	0,60	0,32
Edificio Municipalidad de San José	4,61	2,91	0,90	1,16	0,12	0,55	0,41
La Ribera, Belén	4,67	2,60	0,67	0,74	0,12	0,30	0,35
La Asunción, Belén	4,33	2,89	0,89	0,86	0,12	0,33	0,44

Los resultados igualmente muestran un patrón de concentraciones de sulfato y nitrato mayores en esa región. Esto se explica porque los óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x) generados por la quema de combustibles fósiles en la zona urbana e industrial, pueden ser transportados varios kilómetros en la dirección del viento predominante, antes de que concluyan las reacciones químicas que dan origen a la acidez de

las precipitaciones y finalmente se depositen en forma de sulfatos y nitratos. De ahí que la acidez del agua de lluvia se correlacione con la cantidad de sulfatos y nitratos. El tiempo medio de permanencia en la atmósfera para el dióxido de azufre (SO₂) es de un día, mientras que el estimado para óxidos de nitrógeno (NO_x), es de uno a cuatro días (Wallace y Hobbs, 2006). Debido a este tiempo de vida relativamente corto, los

efectos de la lluvia ácida se circunscriben a una escala local o regional, pero no a una global.

Además del análisis de sulfatos (SO_4^{2-}) y nitratos (NO_3^-), en las muestras de depósito húmedo se determina la concentración de iones: cloruro (Cl^-), amonio (NH_4^+), calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+) y potasio (K^+). La presencia de estos iones en el agua de lluvia es producto de la contribución de diferentes fuentes de contaminación, de los procesos de transformación y del transporte en la atmósfera. Los resultados proporcionan información importante para la identificación de fuentes y mejorar el conocimiento sobre la dinámica atmosférica regional. La composición de las precipitaciones también proporciona información para entender los procesos de acidificación en suelos y aguas, ya que el valor del pH es resultado del balance que existe entre los componentes.

Conclusiones

1. La variación interanual en las concentraciones de PM_{10} para los sitios de muestreo rompió la tendencia al descenso mostrada en años anteriores, de esta forma un número importante de estaciones mantuvieron concentraciones estables e inclusive en algunos casos ligeramente superiores.
2. Las concentraciones de los iones sulfato y nitrato presentes en las partículas PM_{10} se incrementan a una tasa anual cercana al 8% lo que evidencia indirectamente el aumento en las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno en la cuenca atmosférica.
3. Un hallazgo importante durante el año 2012, resulta el incremento en al menos el 80% de los sitios de monitoreo de las concentraciones de manganeso en partículas PM_{10} , en tasas que rondan desde 70 a 250% con respecto a los valores obtenidos en el año 2011. Inclusive en algunas de las estaciones de monitoreo se incumple los valores recomendados por la OMS.
4. Los promedios anuales de partículas $PM_{2,5}$ en el país, superan las normas anuales establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos en cuatro de los cinco sitios monitoreados. Lo anterior, requiere de la formulación de un plan integral de intervención que permita entre otros: establecer normas nacionales para este contaminante, vigilancia sistemática de las concentraciones de $PM_{2,5}$ en los distintos centros urbanos, identificación exhaustiva de las principales fuentes emisoras y el establecimiento de las estrategias a ser implementadas para la reducción de las mismas.
5. Los niveles de dióxido de nitrógeno en 9 de los 25 sitios presentan concentraciones mayores al criterio y se encuentran creciendo a una tasa superior al 10%. En el caso de este contaminante por el patrón de incumplimiento sostenido en el tiempo se requiere entre otras cosas: cambio el monitoreo de técnicas pasivas a equipo automático, vigilancia y establecimiento de metas de velocidad de circulación en las principales calles y avenidas de la región metropolitana, regulación de la importación de vehículos usados, definición de una política de mejora de combustibles, entre otras.
6. Los resultados de caracterización química de la depositación total evidencian un año más, el avance de un proceso sostenido de acidificación de la atmósfera, el cual es consistente con el incremento en los niveles de dióxido de nitrógeno en la GAM.

Referencias

Figueruelo, J.E. Química física del ambiente y de los procesos medioambientales. Editorial Reverte, México 2004, pp 69-75.

Krupa, S. V. (1999). Polución, población y plantas. Trad. M. Bauer. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

Larssen, T. ; Lydersen, E.; Tang, D.; He, Y.; Gao, J.; Liu, H.; Duan, L.; Seip, H.M.; Vogt, R.D.; Mulder, J.; Shao, M.; Wang, Y.; Shang, H.; Zhang, X.; Solberg, S.; Aas, W.; Økland, T.; Eilertsen, O.; Angell, V.; Liu, Q.; Zhao, D.; Xiang, R.; Xiao, J.; Luo, J.. (2006). "Acid rain in China". *Environmental Science & Technology*. 40(2):418-425.

Marcazzan, S., Vaccaro, G., Vecchi, R., 2001 Characterisation of PM10 and PM2.5 particulate matter in the ambient air of Milan (Italy). *Atmospheric Environment* 35, 4639–4650.

Organización Mundial de la Salud. (2000). Air Quality Guidelines for Europe. Regional Office for Europe. European Series. No. 91. 2a. ed. Copenhagen.

Pérez, M.; Cetina, V.; Aldrete, A., Fenn, M. E.; Landois, L. (2006). "Química de la precipitación pluvial en dos bosques de la cuenca de la Ciudad de México". *Agrociencia*. 40(002): 239-248. Colegio de Postgraduados. Texcoco, México.

Seinfeld, J.H. and Pandis, S.N., 2006. Atmospheric Chemistry and Physics—From Air Pollution to Climate Change, John Wiley & Sons, Inc, New York.

Terzi, E., Argyropoulos, G., Bougatioti, A., Mihalopoulos, N., Nikolaou, K., Samara, C., 2010. Chemical composition and mass closure of ambient PM₁₀ at urban sites. *Atmospheric Environment* 44, 2231–2239.

US Environmental Protection Agency. (2010). Our Nation's Air. Status and trends through 2008. Publicación no. EPA-454/R-09-002.