



CONSEJO NACIONAL  
DE RECTORES



# DECIMOSÉPTIMO INFORME ESTADO DE LA NACIÓN (2010)

## TENDENCIAS DE LA CONTAMINACION DEL AIRE Y AGUA SUPERFICIAL DEL GRAN AREA METROPOLITANA DE COSTA RICA: 2006-2010

Informe final

Investigador:

**Jorge Herrera Murillo**

Agosto, 2011

**Nota: Las cifras de las ponencias pueden no coincidir con las consignadas por el Decimoséptimo Informe Estado de la Nación (2010) en el tema respectivo, debido a revisiones posteriores. En caso de encontrarse diferencia entre ambas fuentes, prevalecen las publicadas en el Informe.**

Descriptores .....	1
Resumen Ejecutivo .....	1
Hechos relevantes.....	1
Contaminación de aguas superficiales en el Área Metropolitana:.....	1
Contaminación del aire en el Área Metropolitana: .....	2
Introducción.....	2
1. Contaminación en Aguas Superficiales en la Subcuenca del Río Virilla:.....	3
2. Contaminación del aire en el Área Metropolitana: 2006-2009. ....	13
2.1 Análisis de las tendencias de calidad del aire en la GAM:.....	15
Bibliografía:.....	25

## **Descriptores**

Contaminación, aguas superficiales, calidad del aire, Gran Área Metropolitana, Subcuenca Río Virilla.

## **Resumen Ejecutivo**

La presente ponencia analiza los resultados de las campañas de monitoreo de la calidad química de los cuerpos de agua superficiales que componen la subcuenca del río Virilla y los datos de la calidad del aire del Área Metropolitana. Asimismo, estudia las principales tendencias de evolución de los contaminantes como información de partida para el establecimiento de planes y políticas de intervención tendientes a mejorar el estado de situación ambiental en esta región del país. No obstante, la tasa de contaminación en los cuerpos de agua de la subcuenca está aumentando de manera positiva en los últimos 4 años, lo cual se debe principalmente a la importante contribución de las fuentes antropogénicas, especialmente de los vertidos de aguas residuales. Esta situación aunada a la exposición a la contaminación del aire se encuentra asociada con una amplia gama de efectos agudos y crónicos, que van desde leves perturbaciones fisiológicas hasta la muerte prematura por enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

## **Hechos relevantes**

### **Contaminación de aguas superficiales en el Área Metropolitana:**

-Alrededor de 56% de los sitios de muestreo de la calidad del agua superficial de la subcuenca del Río Virilla (2006-2009), muestran niveles de contaminación de moderada a severa.

- Los sitios que presentaron contaminación de moderada a grave se caracterizan por altas concentraciones de DQO (60-85 mg O<sub>2</sub> / l), SST (43-113 mg / l), nitrito y amonio.

-La mayoría de los sitios severamente contaminados se encuentran en las siguientes microcuencas: Río Torres (7), Río Pacacua (3), Río La Uruca (2) y Río Virilla (1).

-Las principales fuentes de contaminación que explican las variaciones en la composición química de los cuerpos de agua de la subcuenca del Río Virilla son: la contribución de minerales provenientes de los diferentes tipos de suelos, la carga de sedimentos y los vertidos de aguas residuales no tratadas.

-La tasa de contaminación en los cuerpos de agua de la subcuenca están aumentando de manera positiva en los últimos 4 años, entre un 5 a un 17% anual dependiendo del parámetro a ser evaluado. El aumento se debe principalmente a la importante contribución de las fuentes antropogénicas, especialmente de los vertidos de aguas residuales.

### **Contaminación del aire en el Área Metropolitana:**

-Las concentraciones de algunos contaminantes criterio del aire (PM<sub>10</sub> y NO<sub>2</sub>) registrados en las ciudades de San José, Heredia y Belén no superan las normas establecidas para 24 horas (exposición aguda) sin embargo, en algunos casos, presentan valores mayores al ser comparados con los límites máximos declarados en el decreto 30221-SALUD para un período de un año. Lo anterior evidencia, la necesidad de desarrollar políticas tendientes a abatir de forma gradual y sostenida la contaminación atmosférica con el fin de proteger a los habitantes de la región de una exposición crónica sostenida a diversos contaminantes del aire.

-Al analizar la tendencia de los valores de PM<sub>10</sub> registrados para los cinco sitios de monitoreo en el período 2007-2009, se puede observar una tendencia descendente con tasas que varían desde el 6 al 14% anuales. Entre los principales hechos que pueden explicar este comportamiento se encuentran la mejora en la calidad de los combustibles (reducción del contenido de azufre (S) en el combustible) y la operación efectiva del sistema de revisión técnica vehicular. En esta misma línea, cabe resaltar como aspecto positivo que los niveles de sulfato presentes en las partículas PM10 venían decreciendo en forma gradual a una tasa cercana al 5% anual desde el año 2007.

-Es recomendable generar políticas públicas tendientes a mejorar la vialidad en los sitios de ciudad que persisten con valores de NO<sub>2</sub> que superan la norma anual de la Organización Mundial de la Salud y permitir una mayor sostenibilidad del crecimiento urbano sin causar deterioro a la salud de sus habitantes, favoreciendo el uso de transporte público sobre los vehículos individuales.

### **Introducción**

La presente ponencia tiene como objetivo analizar los resultados de las campañas de monitoreo de la calidad química de los cuerpos de agua superficiales que componen la subcuenca del río Virilla y los datos de la calidad del aire del Área Metropolitana, con el fin de analizar las principales tendencias de evolución de los contaminantes como información de partida para el establecimiento de planes y políticas de intervención tendientes a mejorar el estado de situación ambiental en esta región del país

### **1. Contaminación en Aguas Superficiales en la Subcuenca del Río Virilla:**

La contaminación de las aguas superficiales con productos químicos tóxicos y los procesos de eutrofización de los ríos causados por las descargas libres de aguas residuales con alto contenido de nutrientes son los principales problemas presentes en la mayoría de las cuencas en los países en desarrollo (Kowalkowski et al., 2006). La degradación de la calidad del agua debido a la incorporación de estos contaminantes se ha traducido en la disminución de la salud general de las comunidades acuáticas de estos ecosistemas (Campbell et al, 1993).

Si bien es cierto que los ríos pueden asimilar y transportar una parte de los residuos generados a partir de fuentes puntuales, tales como descargas de aguas residuales municipales e industriales y fuentes difusas como la escorrentía de las tierras agrícolas y áreas urbanas, no todos poseen la misma capacidad de autodepuración, de forma tal que la calidad del agua dulce refleja los efectos combinados de muchos procesos a lo largo de las vías de agua y está fuertemente influenciado por las características de la cuenca incluyendo litología, aportes atmosféricos, las condiciones climáticas y las aportaciones antropogénicas (Bricker y Jones, 1995; Bhaduri et al., 2001; Ren et al., 2003; Xian et al., 2007).

La subcuenca del río Virilla se encuentra en la región occidental-central de Costa Rica (Figura 1) y posee una precipitación media anual en el rango de  $2638 \pm 900$  mm. La temporada de lluvias va de mayo a noviembre, pero la mayor parte de la precipitación ocurre durante los meses de septiembre y octubre. El área total de esta cubre aproximadamente  $916,1 \text{ km}^2$  y representa sólo el 1,8% del total del territorio de Costa Rica. Sin embargo, en esta subcuenca vive el 50% (2 250 330) de la población del país distribuidos en veintisiete municipios, los cuales no tienen ningún tipo de coordinación entre ellos en términos de manejo de cuencas (INEC. 2000). Los recursos hídricos generados en la zona, proveen de agua potable al 54% de la población en el área metropolitana de Costa Rica y se utiliza para generar el 15% de la energía hidroeléctrica que se consume en el país. El principal uso de la tierra predominante en la cuenca son urbanos (32,1%), hierba (25,2%), plantaciones de café (17,4%), forestales (8%) y las plantaciones de caña de azúcar (3,5%) (CATIE. 2004).

Figura 1. Localización de la subcuenca del Río Virilla



El rápido crecimiento de la economía en esta zona ha provocado importantes cambios en los patrones de uso de suelo y cobertura vegetal ocasionando una importante degradación de la calidad del agua superficial en dicha subcuenca. Esta degradación del medio ambiente no sólo impide el desarrollo sostenible, sino que también pone en peligro la salud del estado de las poblaciones humanas.

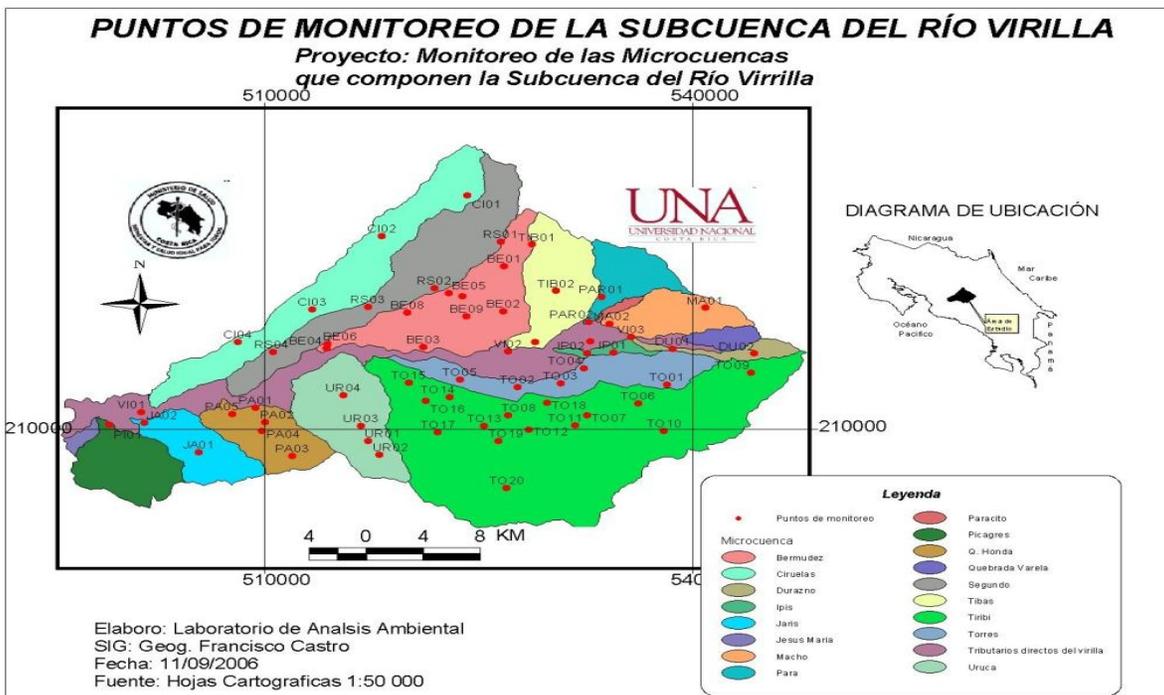
La evaluación precisa de la clase y extensión de la contaminación del agua es una tarea difícil debido a los diversos procesos y fenómenos complejos que caracterizan a estos ambientes. Sin embargo, es una tarea fundamental, ya que se requiere contar con la información del estado de degradación ambiental de estos ecosistemas para orientar las políticas y planes de intervención orientados a la recuperación de estos ecosistemas.

El Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional monitorea desde enero de 2006, la calidad del agua superficial en 64 sitios distribuidos en las 17 microcuencas que conforman la subcuenca del río Virilla (figura 2), a saber: Ciruelas (CI), Segundo (RS), Bermúdez (BE), Tibás (TIB), Pará (PAR), Paracito (PARC), Macho (MA), Durazno (DU), Quebrada Varela (QV), Ipis (IP), Torres (TO), Rivera (RIV), Uruca (UR), Jaris (JA), Picagres (PI), Jesús María (JM) y Pacacua (PA).

Las variables físico-químicas (desviación media y estándar) medidas, en cada microcuenca, desde enero 2006 a diciembre 2009 (cuatro rondas de muestreo por año: época seca, época lluviosa y transición entre las épocas) se resumen en el cuadro I.

Debido a la presencia de algunos factores fisiográficos que influyen de manera significativa en la composición química del agua, existen algunas diferencias entre las microcuencas ubicadas al noroeste de la subcuenca con respecto a la región sureste. La zona sureste de la subcuenca del Río Virilla se caracteriza por el predominio de suelos de tipo vertisoles, que se caracterizan por ser suelos fértiles de pH elevado y alto contenido de calcio (Ca) y magnesio (Mg). Esto podría justificar la presencia de porcentajes (equivalentes) mayores de Ca y Mg en microcuencas como Pacacua y Torres (Ca: 17,3%, 25,2% y Mg: 30%, 35,5%, respectivamente) en comparación con los situados en el noroeste de la subcuenca, tales como Río Segundo y Bermúdez (Ca: 13,8%, 13,5% y Mg: 16,6%, 15,9% respectivamente) donde abundan los suelos de tipo Andisoles (MAG, 2004).

Figura 2. Ubicación de los 64 sitios de monitoreo de calidad de aguas superficiales ubicados en la subcuenca del Río Virilla



La clasificación de calidad del agua superficial generalmente se basa en una comparación de los datos de concentración de los contaminantes medidos en el campo contra los valores límite establecidos en los instrumentos jurídicos. Las normas de calidad para los ríos y otros cuerpos de agua están definidos en base a los usos potenciales del agua. Las normas para la evaluación y clasificación de calidad del agua superficial en Costa Rica (Decreto 33903 MINAE-S) definen cinco clases de uso del agua. Sin embargo, hay métodos alternativos para la evaluación de la calidad de los patrones de las aguas superficiales.

La evaluación global Fuzzy (FCA de acuerdo a sus siglas en inglés) se puede utilizar para mejorar la comprensión de los diversos procesos y fenómenos complejos

**Cuadro 1. Promedios y desviación estándar de las variables fisicoquímicas monitoreadas en las microcuencas que componen la subcuenca del Río Virilla: 2006-2009.**

	MICROCUENCAS										
	Ciruelas	Segundo	Bermúdez	Torres	Uruca	Tibás	Picagres	Pacacua	Ipis	Macho	Jaris
pH	7.46 ± 0.34	7.35 ± 0.42	7.33 ± 0.50	7.35 ± 0.44	7.82 ± 0.41	7.33 ± 0.47	8.27 ± 0.17	7.82 ± 0.39	7.70 ± 0.37	7.60 ± 0.50	8.22 ± 0.24
Turbiedad (NTU)	2.55 ± 3.45	3.77 ± 5.23	8.61 ± 9.13	11.3 ± 20.6	8.22 ± 9.94	4.99 ± 7.62	5.77 ± 5.23	31.2 ± 77.8	2.37 ± 2.18	1.15 ± 0.98	5.67 ± 6.64
Sólidos Sediment. (ml/l)	0.2 ± 0.1	0.21 ± 0.17	0.45 ± 0.90	0.35 ± 0.45	0.20 ± 0.15	0.15 ± 0.05	0.11 ± 0.03	0.25 ± 0.20	0.10 ± 0.05	0.15 ± 0.10	0.10 ± 0.02
Sól. Suspendidos Totales (mg/l)	10.2 ± 8.4	18.5 ± 17.0	39.3 ± 88.3	69 ± 151	50 ± 64	11.5 ± 13.5	17.0 ± 9.6	164 ± 402	9.6 ± 8.7	6.7 ± 8.2	23.3 ± 19.7
DQO (mg O <sub>2</sub> /l)	34 ± 28	71 ± 63	79 ± 78	85 ± 64	53 ± 58	60 ± 66	43 ± 27	62 ± 46	55 ± 34	45 ± 26	69 ± 35
DBO (mg O <sub>2</sub> /l)	15 ± 9	23 ± 27	25 ± 24	29 ± 22	15 ± 7	22 ± 34	14 ± 8	19 ± 12	20 ± 13	13 ± 7	16 ± 10
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	4.88 ± 4.34	5.59 ± 5.67	12.5 ± 9.9	9.32 ± 6.41	4.18 ± 4.87	3.61 ± 3.66	1.81 ± 0.69	3.01 ± 2.86	10.6 ± 3.0	3.2 ± 2.6	1.7 ± 0.7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	10.2 ± 5.4	12.3 ± 14.6	15.6 ± 12.0	16.6 ± 8.8	7.7 ± 3.0	4.34 ± 5.06	6.29 ± 3.53	12.3 ± 6.2	19.2 ± 4.1	6.6 ± 2.2	9.7 ± 3.7
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	4.8 ± 4.0	5.2 ± 4.5	5.5 ± 7.2	6.8 ± 5.1	4.6 ± 2.6	2.54 ± 2.80	1.60 ± 0.75	3.28 ± 2.76	10.6 ± 3.7	3.5 ± 2.6	1.3 ± 0.5
P total (mg/l)	1.05 ± 0.90	1.20 ± 1.15	1.87 ± 1.26	2.05 ± 1.15	0.83 ± 0.64	1.10 ± 0.90	0.76 ± 0.41	0.95 ± 0.92	0.73 ± 0.49	0.66 ± 0.46	0.65 ± 0.34
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (µg/l)	207 ± 347	92 ± 136	426 ± 693	330 ± 355	45 ± 46	40 ± 22	36 ± 24	191 ± 287	473 ± 403	53 ± 38	66 ± 72
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (µg/l)	311 ± 406	177 ± 197	996 ± 1535	806 ± 844	150 ± 122	143 ± 158	165 ± 160	311 ± 188	702 ± 346	131 ± 113	158 ± 112
Na (mg/l)	5.95 ± 3.61	5.84 ± 5.21	13.7 ± 10.4	11.0 ± 7.5	5.2 ± 3.2	3.68 ± 3.62	6.46 ± 1.73	7.58 ± 5.48	13.7 ± 8.5	4.5 ± 1.9	6.8 ± 2.9
K (mg/l)	2.47 ± 0.87	2.35 ± 1.36	4.89 ± 2.63	4.34 ± 2.16	1.11 ± 0.83	1.46 ± 0.94	1.29 ± 0.36	1.82 ± 1.41	5.2 ± 1.9	3.2 ± 1.1	1.8 ± 1.5
Ca (mg/l)	2.75 ± 1.67	2.17 ± 1.32	5.36 ± 3.15	7.89 ± 4.42	10.5 ± 6.4	4.4 ± 4.6	11.2 ± 4.1	9.2 ± 10.2	13.7 ± 2.3	2.5 ± 0.7	13.5 ± 1.7
Mg (mg/l)	2.31 ± 1.42	2.95 ± 2.02	3.78 ± 2.28	4.25 ± 1.80	4.05 ± 1.52	5.31 ± 2.04	4.70 ± 2.15	4.13 ± 2.02	5.50 ± 1.32	5.50 ± 1.32	5.90 ± 3.70
Al (µg/l)	320 ± 214	254 ± 184	336 ± 209	312 ± 246	283 ± 188	318 ± 283	212 ± 176	147 ± 155	160 ± 44	108 ± 32	171 ± 53

Tendencias de la contaminación del aire y agua superficial del Gran Área Metropolitana de Costa Rica: 2006-2010

	MICROCUENCAS										
	Ciruelas	Segundo	Bermúdez	Torres	Uruca	Tibás	Picagres	Pacacua	Ipis	Macho	Jaris
Fe (µg/l)	153 ± 238	147 ± 71	253 ± 367	177 ± 273	116 ± 105	241 ± 406	256 ± 340	183 ± 141	208 ± 256	152 ± 204	103 ± 88
Cr (µg/l)	14.3 ± 9.1	13.7 ± 14.9	16.2 ± 23.2	58.3 ± 44.2	8.1 ± 6.4	20.5 ± 27.6	14.3 ± 12.7	24.4 ± 22.0	24.4 ± 22.0	15.2 ± 9.6	8.1 ± 5.3
Cu (µg/l)	15.2 ± 1.5	14.8 ± 3.2	17.1 ± 6.4	23.6 ± 41.3	14.6 ± 7.8	12.3 ± 3.9	8.7 ± 3.1	10.0 ± 4.7	9.6 ± 6.0	11.4 ± 4.5	9.2 ± 3.3
Ni (µg/l)	9.3 ± 7.3	10.5 ± 6.8	6.7 ± 4.7	5.6 ± 4.7	5.3 ± 2.1	4.1 ± 2.9	3.6 ± 3.9	3.6 ± 3.9	4.6 ± 2.3	3.6 ± 1.0	6.0 ± 3.2
Pb (µg/l)	5.2 ± 1.1	2.9 ± 1.5	3.7 ± 0.7	8.2 ± 2.1	3.1 ± 1.2	4.6 ± 2.2	2.3 ± 0.5	2.1 ± 0.7	6.5 ± 1.8	4.0 ± 2.1	3.5 ± 0.3
Mn (µg/l)	17.7 ± 18.6	22.8 ± 19.7	40.7 ± 53.7	28.7 ± 21.3	21.2 ± 17.9	28.6 ± 24.1	15.4 ± 19.1	22.1 ± 18.0	34 ± 27	28 ± 13	19 ± 8
Zn (mg/l)	0.30 ± 0.09	0.19 ± 0.06	0.28 ± 0.04	0.37 ± 0.11	0.22 ± 0.05	0.31 ± 0.06	0.25 ± 0.09	0.17 ± 0.11	0.14 ± 0.08	0.10 ± 0.05	0.22 ± 0.07
Temperatura (°C)	22.6 ± 2.4	21.4 ± 3.1	22.1 ± 4.2	21.3 ± 3.1	22.8 ± 1.1	20.2 ± 2.3	22.7 ± 3.2	22.5 ± 1.5	19.8 ± 1.3	18.9 ± 1.5	23.1 ± 1.1
Oxígeno Disuelto (mg O <sub>2</sub> /l)	4.21 ± 1.67	4.09 ± 1.27	3.83 ± 1.45	3.47 ± 1.50	3.95 ± 1.20	4.11 ± 1.66	4.23 ± 1.09	4.10 ± 1.27	4.35 ± 1.05	4.49 ± 0.95	4.05 ± 0.60

Los valores indicados como  $\pm$  corresponden a la desviación estándar del promedio relacionados con los estudios ambientales. El FCA evalúa la importancia de cada componente del sistema en términos de pesos predeterminados y disminuye la complejidad (o falta de claridad) por medio de funciones de pertenencia (Chen et al., 2005), que conducen a una mayor sensibilidad analítica comparada con otras técnicas de evaluación similares (Guleda et al., 2004).

En el monitoreo realizado en los cuerpos de agua superficial, la FCA se utilizó para estimar las variables relevantes para la calidad del agua basadas en la transformación difusa y el principio del grado máximo de afiliación. Para aplicar este método se utilizaron los cinco niveles de calidad del agua incluidos en el Decreto 33903-MINAE-S: Clase 1 (sin contaminación), Clase 2 (contaminación incipiente), Clase 3 (contaminación moderada), Clase 4 (contaminación severa), y la clase 5 (contaminación muy severa). Cada uno de los 64 sitios de monitoreo se asociaron con una clase de la contaminación sobre la base de los grados máximos de afiliación de evaluación difusa (Cuadro 2). De acuerdo con el 33903-MINAE-S, las normas y la información actual sobre la calidad ambiental del área de estudio, la calidad del agua de la Clase 1 se considera limpia o de la condición de baja contaminación (LP), la calidad del agua de la Clase 2 y 3 corresponde a la contaminación moderada (MP), y la calidad del agua de las clases 4 y 5 se considera alta contaminación (HP). Como resultado de la FCA, veintisiete sitios de monitoreo de la subcuenca del río Virilla fueron clasificados como LP; veintidós sitios como MP, y 13 sitios como HP, la mayor parte de ellos se ubicaron en los ríos tributarios en las zonas de alta densidad urbana.

Al comparar los resultados obtenidos para las tres grandes categorías (LP, MP y HP) se encontraron diferencias significativas, entre las tres categorías, para cuatro variables químicas: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendidos Totales (SST), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ).

**Cuadro 2. Resultados de la evaluación global Fuzzy y la clasificación de los 64 sitios de muestreo ubicados en la subcuenca del Río Virilla: 2006-2009**

Sitio de muestreo	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Sitio de muestreo	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
BE-01	0.514	0.304	0.172	0	0	JA-02	0.420	0.246	0.162	0.172	0
BE-02	0.536	0.320	0.133	0	0	MA-01	0.666	0.263	0.071	0	0
BE-03	0.566	0.094	0.320	0	0	MA-02	0.666	0.071	0.263	0	0
BE-04	0.230	0.291	0.186	0.283	0	PA-01	0.361	0.442	0.196	0	0
BE-05	0.230	0.312	0.376	0.072	0	PA-02	0.484	0.182	0.208	0.120	0
BE-06	0.310	0	0.351	0.188	0.142	PA-03	0.233	0.065	0.268	0.332	0.097
BE-07	0.330	0.340	0.177	0.153	0	PA-04	0.038	0.301	0.290	0.323	0.048
BE-08	0.536	0.124	0.268	0.062	0	PA-05	0.312	0.021	0.118	0.536	0.007
BE-09	0.293	0.367	0.197	0.133	0	PAR-01	0.666	0.022	0.311	0	0
CI-01	1	0	0	0	0	PAR-02	0.666	0	0	0.315	0.015
CI-02	0.947	0.053	0	0	0	PI-01	0.511	0.250	0.238	0	0
CI-03	0.648	0.042	0.310	0	0	RS-01	0.666	0.156	0.177	0	0
CI-04	0.276	0.440	0.284	0	0	RS-02	0.470	0.196	0.086	0.245	0
DU-01	0.330	0.293	0.357	0.009	0	RS-03	0.300	0.367	0.276	0.056	0
DU-02	0.330	0.349	0.293	0.019	0	RS-04	0.333	0.204	0.079	0.357	0.023
IP-01	0.667	0.047	0.286	0	0	TIB-01	0.666	0	0.306	0.026	0
IP-02	0.586	0.080	0.095	0.239	0	TIB-02	0.565	0.101	0.120	0.211	0
JA-01	0.313	0.349	0.092	0.245	0	TIB-03	0.666	0.143	0.190	0	0
TO-01	0.330	0.343	0.317	0	0	TO-11	0.330	0.202	0.341	0.127	0
TO-02	0.330	0.291	0.190	0.179	0	TO-12	0.330	0.179	0.124	0.367	0
TO-03	0.330	0.348	0.212	0.100	0	TO-13	0.330	0.194	0.345	0.129	0
TO-04	0.660	0.007	0.323	0	0	TO-14	0.330	0.173	0.353	0.144	0
TO-05	0.330	0.008	0.578	0.074	0	TO-16	0.330	0.348	0.320	0	0
TO-06	0.330	0.345	0.264	0.051	0	TO-17	0.330	0	0.268	0.392	0
TO-07	0.330	0.098	0.182	0.344	0.037	TO-18	0.330	0.264	0.065	0.279	0.051
TO-08	0.330	0.200	0.347	0.123	0	TO-19	0.330	0.141	0.376	0.143	0
TO-09	0.330	0.196	0.347	0.117	0	TO-20	0.330	0.044	0.473	0.143	0
TO-10	0.330	0.233	0.403	0.024	0	VI-01	0.333	0	0.304	0.359	0
UR-01	0.333	0.533	0.133	0	0	VI-02	0.333	0.146	0.366	0.152	0
UR-02	0.666	0.278	0.056	0	0	VI-03	0.327	0.324	0.348	0	0
UR-03	0.333	0.177	0.362	0.124	0	UR-04	0.333	0.053	0.444	0.167	0

Para identificar las principales fuentes de contaminación que afectan la calidad química del agua superficial, se realizó un análisis de factor de los datos normalizados establecidos en las tres zonas de contaminación. El análisis de factor es un método estadístico multivariado que se puede utilizar para describir la varianza entre las variables observadas en términos de un menor número de variables no observadas llamadas factores (Tabachnick y Fidell, 2001). El análisis de factor ha sido utilizado para evaluar una serie de indicadores de calidad del agua y su variación espacial (Wunderlin et al., 2001).

**Cuadro 3. Resultados del análisis de factores aplicados a los datos de monitoreo de calidad del agua superficial en la subcuenca del Río Virilla: 2006-2009**

Parámetro	Contaminación Baja		Contaminación Moderada		Contaminación Alta	
	VF1	VF2	VF1	VF2	VF1	VF2
pH	-0.099	0.181	-0.043	0.269	-0.202	-0.187
Turbiedad	0.719	0.424	0.400	0.664	0.332	-0.164
Sól. Sed	0.043	0.038	-0.122	0.858	0.006	0.133
Sól. Sus. T	0.115	0.734	-0.030	0.897	0.716	-0.193
DQO	0.088	0.859	0.291	0.768	0.947	-0.146
DBO	0.114	0.835	0.368	0.752	0.874	0.339
Cl <sup>-</sup>	0.900	0.296	0.847	0.242	-0.006	0.925
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.681	0.117	0.765	0.212	0.044	0.852
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.244	0.765	0.730	-0.295	-0.027	-0.281
Na <sup>+</sup>	0.860	-0.067	0.786	0.067	0.298	0.886
K <sup>+</sup>	0.915	-0.041	0.573	0.372	0.059	0.907
P Total	0.492	0.152	0.364	0.520	0.928	0.123
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.836	0.088	0.428	0.579	0.702	0.466
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.644	0.504	0.426	0.641	0.824	0.247
OD	0.120	0.379	0.087	0.301	-0.643	0.127
% Varianza Explicada	54.4%	26.5%	41.3%	35.8%	48.9%	18.9%

Los resultados del análisis de factor, junto con los tipos de fuente probables se presentan en el cuadro 3. En la zona de LP, se obtuvieron dos varifactores que explican el 80,9% de la varianza total. El primer varifactor (VF1) representa el 54,4% de la varianza total, y presenta una fuerte correlación entre SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>, los cuales están relacionados con factores naturales, tales como la litología y el tipo de suelo predominante. El segundo varifactor (VF2) explica un 26,5% de la varianza total e incluye la demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). Este factor representa múltiples fuentes de contaminación y puede ser considerado fundamentalmente como la escorrentía urbana y las aguas residuales industriales.

En la zona de MP, el VF1 explica el 41,3% de la varianza total y considera las siguientes especies químicas: sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Este factor representa la contaminación generada por fuentes no puntuales asociadas con la producción agrícola y la influencia de los distintos tipos de suelos. El VF2 explicó 35,8% de la varianza total e incluye DQO, DBO, Sólidos Sedimentables (SS), SST, Fósforo Total (PT), NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Las correlaciones de nutrientes, apoya el argumento de que la eutrofización es un problema de calidad del agua en esta zona debido a la escorrentía de las aguas residuales urbanas.

En la zona de HP, el VF1 explica el 48,9% de la varianza total y correlaciona la DQO, DBO, SST, PT, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y NO<sub>2</sub><sup>-</sup>. Este factor podría ser interpretado como la influencia de la contaminación generada por fuentes puntuales, como por ejemplo descargas de plantas de tratamiento de aguas residuales y efluentes industriales.

Las contribuciones de las distintas fuentes a cada una de las variables de calidad del agua, en los distintos sitios durante el tiempo de muestreo, se calcularon utilizando UNMIX. Lo anterior debido a que el análisis de factor puede ofrecer valiosa información cualitativa sobre las fuentes de contaminación potencial, pero no puede proporcionar datos adecuados sobre la contribución cuantitativa relativa a cada fuente de contaminación a las variables de calidad de agua.

Como se puede observar en el cuadro 4, la DBO, DQO y SST fueron influenciados principalmente por la contaminación de fuentes no puntuales mientras que el  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  fueron influenciados principalmente por factores naturales.

**Cuadro 4. Porcentaje de contribución de las distintas fuentes a cada variable fisicoquímica en las tres categorías de sitios de monitoreo de la Subcuenca del Río Virilla**

Variable	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	No expl.	Relación P/O	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	No expl.	Relación P/O	Fuente 1	Fuente 2	Fuente 3	No expl.	Relación P/O
	LP					MP					HP				
<b>pH</b>	17.8	14.2	-	69	1.235	20.2	26.5	-	53.3	1.106	19.7	31.5	-	48.8	1.175
<b>BOD</b>	21.6	78.4	-		1.072	14.4	85.6	-		1.033	7.1	92.4	-		0.996
<b>COD</b>	24.9	75.1	-		0.997	15.3	84.7	-		0.998	6.6	95.4	-		1.020
<b>TSS</b>	17.3	62.2	20.5	-	0.983	12.2	87.8	-		1.009	3.1	96.9	-		0.995
<b>Turbidity</b>	55.5	32.5	12.0		0.995	27.7	72.3	-		1.085	14.5	85.5	-		1.014
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	81	11.5	-	7.5	0.962	70.4	29.6	-		0.994	62.3	37.7	-		0.953
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	34.3	50.7	15.7		1.129	25.5	74.5	-		1.132	17.5	82.5	-		1.077
<b>Cl<sup>-</sup></b>	89.5	11.5	-		1.087	82.7	17.3	-		1.018	71.3	28.7	-		1.022
<b>Na<sup>+</sup></b>	93.1	6.9	-		0.965	85.9	14.1	-		1.073	80.1	19.9	-		0.975
<b>K<sup>+</sup></b>	90.5	9.5	-		0.942	87.2	10.1	-	<b>2.7</b>	0.998	86.2	13.8	-		0.994
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	88.5	9.3	-	2.2	0.970	87.5	12.5	-		0.979	84.1	15.9	-		0.951
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	62.6	26.9	10.5		0.961	67.2	22.8	-		1.011	73.1	26.9	-		0.993
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>	50.0	14.6	35.4		1.069	33.2	66.8	-		1.026	11.4	88.6	-		1.005
<b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>	60.1	28.8	11.1		0.908	33.4	66.4	-		0.996	20.3	79.7	-		0.937

**Fuente 1: Factores naturales tales como litología y tipo de suelos. Fuente 2: Descargas de aguas residuales industriales y domésticas. Fuente 3: Fuentes no puntuales asociadas con la producción agrícola.**

Los parámetros en la zona de MP fueron influenciados principalmente por la contaminación de fuentes múltiples de la escorrentía urbana y las aguas residuales industriales (85,6% para la DBO y 84,7%, y 87,8% para la DQO). Los contaminantes en esta zona provienen típicamente de fuentes mixtas. En la zona de HP, las contribuciones pertinentes se deben principalmente a los contaminantes generados en las actividades industriales y urbanas (92,4%, 95,4%, 96,9% y 88,6% de la DBO, DQO, SST,  $\text{NH}_4^+$ , respectivamente).

**Cuadro 5. Evolución de los porcentajes de contribución de cada fuente a la calidad de las aguas en las diferentes microcuencas de la subcuenca del Río Virilla: 2006-2009**

Microcuenca	2006		2007		2008		2009	
	Fuente 1	Fuente 2						
Bermúdez	23.2	62.5	19.6	68.8	16.4	73.9	15.2	76.4
Segundo	29.5	54.9	27.3	58.2	27.1	61.0	29.5	64.0
Ciruelas	37.9	58.7	35.2	60.3	32.4	64.7	30.1	66.8
Tibás	31.6	52.9	32.8	50.3	35.4	47.2	37.3	44.2
Macho	27.5	66.4	25.1	67.8	23.0	69.2	22.1	70.7
Torres	19.6	71.2	18.4	73.6	17.0	75.3	15.0	78.3
Pacacua	14.3	76.8	13.0	79.5	12.5	80.2	11.3	83.1
Uruca	11.9	68.4	10.3	70.1	9.9	73.7	8.0	79.2
Picagres	27.3	72.2	23.9	74.8	15.4	77.1	11.7	84.3

Si se analiza la evolución de la contribución de cada una de las fuentes entre 2006-2009 (cuadro 5) se puede apreciar que para las microcuencas del Río Torres, Bermúdez y Segundo se mantiene una tasa de incremento del 8,7% anual del aporte de las fuentes provenientes del vertido de aguas residuales tanto industriales como domésticas. Para este caso, los parámetros de calidad de agua más afectados corresponden a DQO, DBO, SST y amonio los cuales presentan un incremento que varía del 8 a 19% anual.

## 2. Contaminación del aire en el Área Metropolitana: 2006-2009.

En los últimos 15 años se ha producido un avance en la investigación científica sobre los efectos de la contaminación del aire en la salud y en la actualidad es ampliamente aceptado que la exposición a la contaminación del aire urbano está asociada con una amplia gama de efectos agudos y crónicos, que van desde leves perturbaciones fisiológicas hasta la muerte prematura por enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Cohen et al., 2004).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que a nivel mundial alrededor de 1500 millones de personas viven en áreas con niveles peligrosamente elevados de contaminación del aire (Chelala, 1999). Más de dos millones de muertes prematuras se pueden atribuir cada año a los efectos de la contaminación del aire en espacios abiertos urbanos y en espacios cerrados, y más de la mitad ocurre en poblaciones de países en desarrollo (Organización Mundial de la Salud, 2006a). Dependiendo de la edad, género,

estado de salud, condición física y nivel socioeconómico, los efectos negativos de la contaminación del aire en la salud humana pueden ser evidentes o asintomáticos, aún en condiciones en las que aparentemente no existen molestias puede existir un daño subclínico. La evidencia científica indica que los aumentos menores de algunos contaminantes pueden provocar incrementos pequeños, pero cuantificables, en las visitas a salas de emergencia, en admisiones hospitalarias y casos de muerte (Organización Mundial de la Salud, 2006b).

Cada contaminante en la atmósfera debe ser medido de manera apropiada, que produzca resultados ciertos y reproducibles, y para ello se han desarrollado técnicas y aparatos o equipos de medición idóneos que permiten determinar la evolución de los contaminantes tanto temporal como espacialmente y así poder evaluar los niveles de exposición de la población. Los resultados obtenidos del monitoreo de la contaminación del aire deben ser comparados con valores criterio o normas establecidas de acuerdo con estudios toxicológicos, con el fin de poder generar un dictamen sobre la calidad del aire de una determinada región.

En Costa Rica, existe el Decreto 30221-SALUD **“Reglamento sobre Inmisión de Contaminantes Atmosféricos”**, publicado el 21 de marzo de 2002 en el alcance 25 del Diario Oficial La Gaceta, contiene las normas nacionales de calidad del aire. Dichas normas de calidad del aire establecen las concentraciones máximas de contaminantes en el ambiente que no debieran sobrepasarse, para que pueda garantizarse que se protege adecuadamente la salud de la población, inclusive la de los grupos más susceptibles como los niños, los ancianos y las personas con enfermedades respiratorias crónicas, entre otros. Estas normas fueron elaboradas por el Ministerio de Salud con la participación de representantes de la academia, de los sectores productivos y otras instituciones de gobierno.

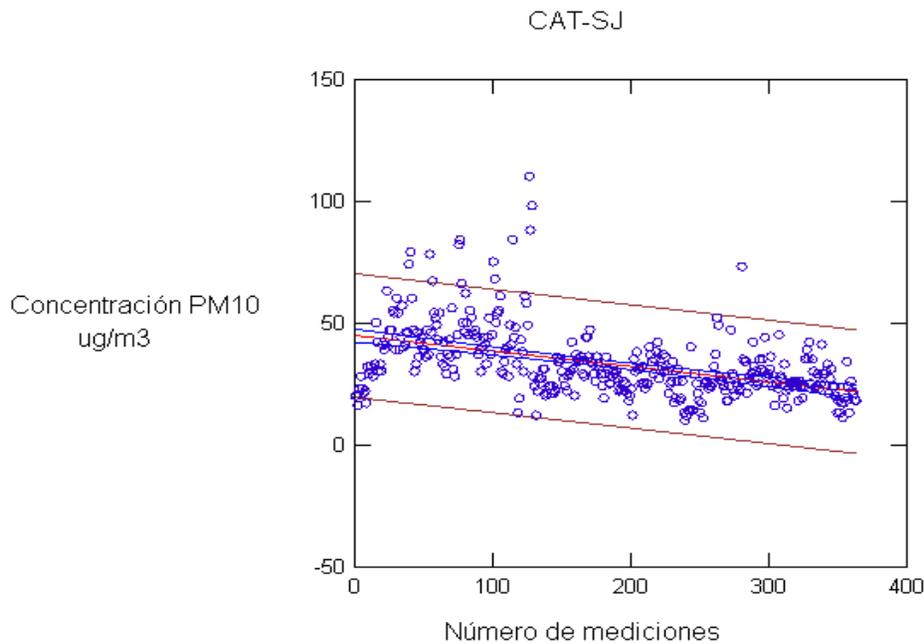
El primer intento de elaborar un diagnóstico sobre el problema de la contaminación del aire en Costa Rica, se inició en 1971 con el apoyo de la Organización Panamericana de la Salud, y se interrumpió en 1973. En 1979, se coordinó un estudio que permitió valorar la presencia de algunos contaminantes en el aire, reportando que las concentraciones obtenidas superaban las registradas en 1971. En 1989, un estudio parcial estableció el serio daño causado por la contaminación del aire sobre el edificio del Teatro Nacional, ubicado en la ciudad de San José, y en 1993, el Programa de Estudios de Calidad del Aire (PECAire) de la Universidad Nacional, inicio una campaña de monitoreo de calidad del aire en San José, para seis sitios, incluyendo los siguientes contaminantes: PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>. Este monitoreo realizado con una mezcla de métodos manuales y pasivos se extendió hasta el año 2000, cuando concluyó el financiamiento aportado por la fundación suiza SWISSCONTACT (Herrera y Rodríguez, 2007). Al inicio de esta campaña de monitoreo se obtenían concentraciones de PM<sub>10</sub> para la ciudad de San José de 57 µg/m<sup>3</sup> como promedio anual, valores que disminuyeron casi en un 20% para el año 1999, a partir de la entrada en vigencia del primer intento de un programa de revisión técnica vehicular denominado “ECOMARCHAMO” (Alfaro, 1999).

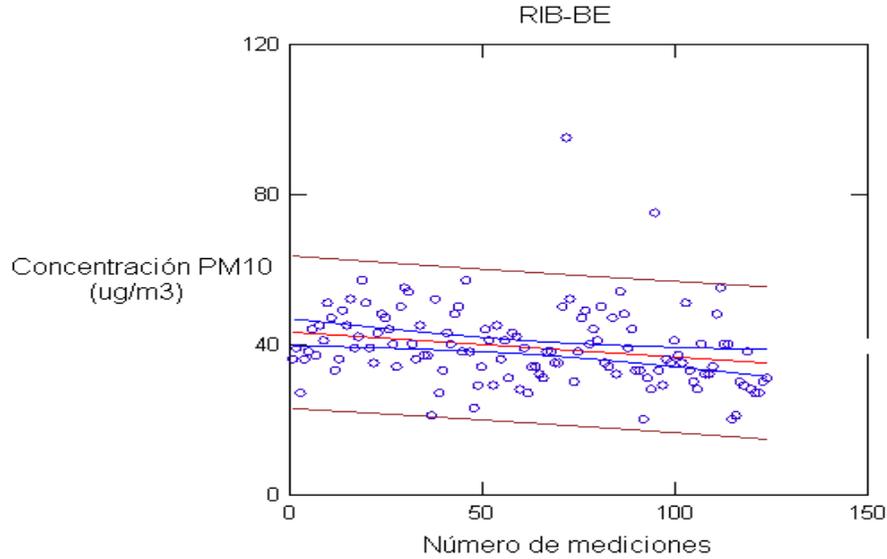
No es sino a partir del año 2003, cuando el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, en coordinación con el Ministerio de Salud y la Municipalidad de San José, reanudan el monitoreo de las concentraciones de partículas  $PM_{10}$  en dos sitios y de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ) en 14 sitios de la Ciudad de San José, manteniendo actividades hasta la fecha. Posteriormente en el año 2007, se inician mediciones de la composición química de las partículas  $PM_{10}$  incluyendo iones (sulfato, cloruro, nitrato, fosfato, nitrito, fluoruro, amonio) y metales pesados (vanadio, cromo, plomo, cobre, níquel, manganeso, aluminio, hierro, calcio, magnesio, sodio, potasio). En forma adicional para este año inician operaciones estaciones de monitoreo de partículas  $PM_{10}$  y dióxido de nitrógeno en Belén y Heredia.

## 2.1 Análisis de las tendencias de calidad del aire en la GAM:

Al analizar la tendencia registrada por los datos de partículas  $PM_{10}$  para los cinco sitios de monitoreo que operan en el Área Metropolitana de Costa Rica (Catedral Metropolitana de San José CAT-SJ, Junta de Educación de San José JE-SJ, Rectoría de la UNA REC-HE, La Ribera Belén RIB-HE y La Asunción Belén AS-BE) en los últimos tres años (2007-2009) se puede observar que se presenta una marcada tendencia al descenso en todos los sitios de medición (figura 3).

**Figura 3. Tendencia de los valores de  $PM_{10}$  registrados para las estaciones CAT-SJ y RIB-BE, años 2007-2009.**





De esta forma se presentan tasas de disminución que varían desde 6,3% anual para el caso de CAT-SJ (cuadro 6) y 6,6% para RIB-BE hasta un 14,3% anual para REC-HE ubicado en la ciudad de Heredia. Este descenso en los niveles de partículas pudiera deberse a la disminución sostenida del contenido de azufre en el diesel (2500 a 100 ppm) ejecutado por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE), el cual se encuentra directamente relacionado con las emisiones de partículas en fuentes móviles, especialmente de autobuses y vehículos de carga pesada.

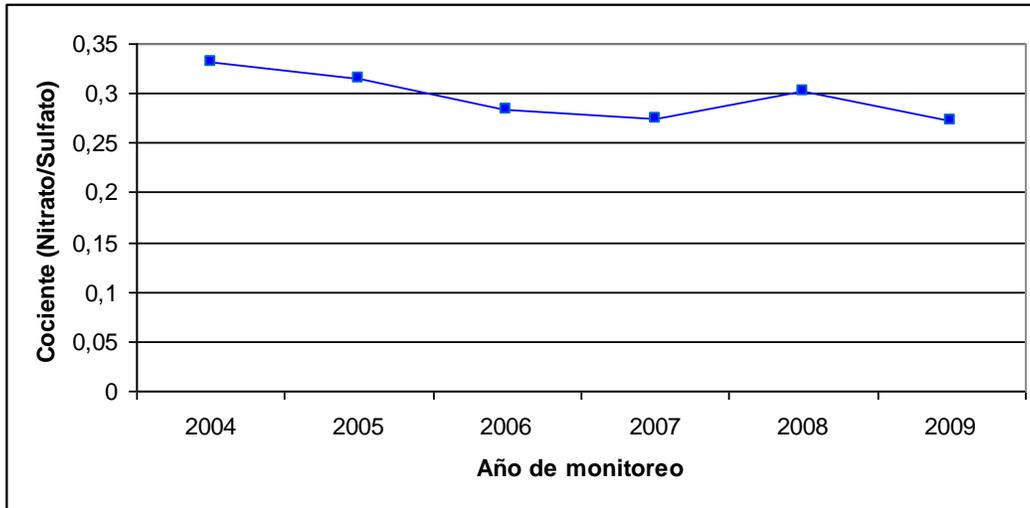
**Cuadro 6. Variación de los promedios anuales de la concentración de PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) en los dos sitios de muestreo ubicados en la Ciudad de San José, 2004-2009.**

	Catedral Metropolitana						Junta de Educación					
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2004	2005	2006	2007	2008	2009
<b>Promedio</b>	46	41	33	44	29	27	26	28	26	30	26	28
<b>Máximo</b>	66	51	41	53	37	73	32	40	32	37	32	59
<b>Mínimo</b>	31	31	27	22	23	11	18	21	18	20	21	11
<b>s</b>	12	7	4	9	5	9	5	6	4	5	4	8

A pesar de que se ha reducido el contenido de azufre en diesel a partir del año 2008, si se analiza la evolución de la relación de masa entre  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  (figura 4), la cual ha

sido utilizada como un indicador de la importancia relativa de fuentes móviles versus fuentes estacionarias en el origen tanto del N como del S presente en la atmósfera (Arimoto et al., 1996; Yao et al., 2002; Xiao and Liu, 2004), se puede observar que esta presenta una tendencia a la baja, reforzando la importancia de las emisiones de  $\text{SO}_2$  provenientes de fuentes estacionarias. Este factor puede señalar la importancia de reducir el contenido de azufre en otros combustibles más pesados como el búnker, el cual es mayoritariamente utilizado en fuentes fijas.

Figura 4. Evolución del cociente  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  presente en las partículas PM colectadas en el sitio de monitoreo JE-SJ (2004-2009)

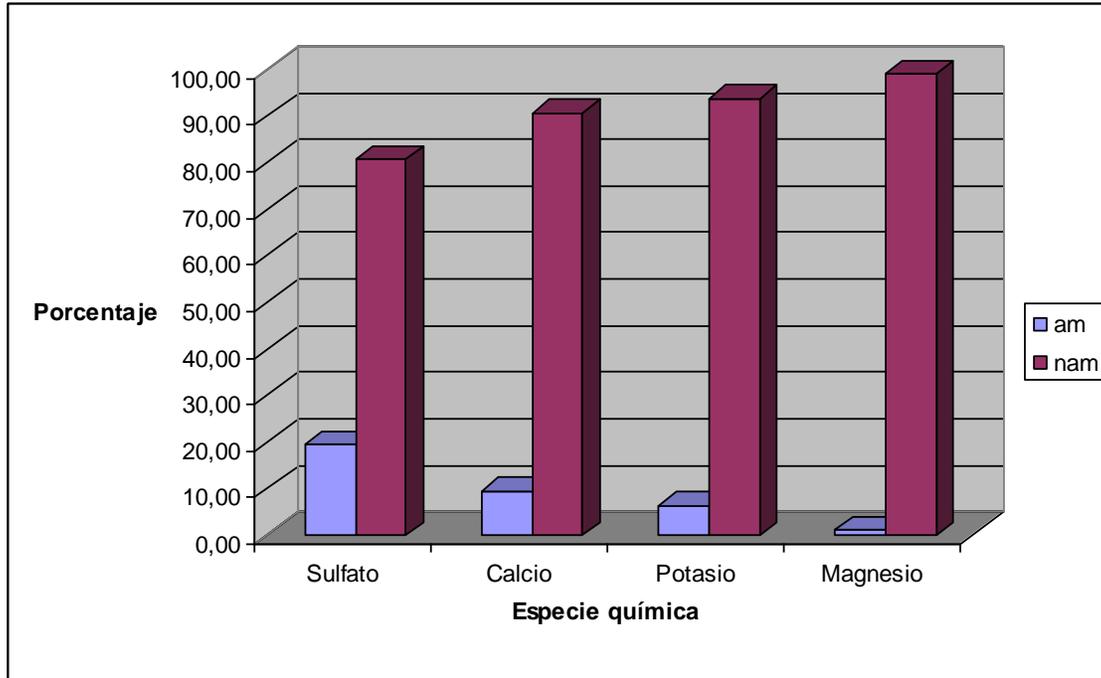


El patrón de vientos predominantes en el Área Metropolitana de Costa Rica favorece el transporte de masas de aire desde los océanos hasta la meseta central, debido a lo anterior es sumamente importante estimar el aporte del aerosol marino a la composición química de las partículas. Basado en la relación de masa de los iones con respecto al Na, el componente debido al aerosol marino se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Duce et al., 1983):

$$[X]_{nam} = Mx - [X/Na]_{am} M_{Na}$$

Donde la expresión  $[X/Na]_{am}$  denota la relación de masa del ion X con respecto al  $\text{Na}^+$  en el agua de mar,  $Mx$  y  $M_{Na}$  la concentración del ion X y del  $\text{Na}^+$  en las partículas  $\text{PM}_{10}$ . De acuerdo con Berg y Winchester (1978), la relación de masa de las siguientes especies:  $\text{SO}_4^{2-}$ , K, Mg y Ca con respecto al Na en agua de mar es de 0,25, 0,037, 0,12 y 0,038 respectivamente. La diferencia entre la concentración del ion presente en las partículas y el componente debido a la contribución marina, corresponde a la fracción originada por fuentes diferentes al aerosol marino  $[X]_{nam}$ . La figura 5 muestra la distribución, tanto de la fracción debida al aerosol marino como la atribuida a otras fuentes. Si se analiza el caso del  $\text{SO}_4^{2-}$ , se puede apreciar que aproximadamente el 81% de la concentración másica de este ion tiene un origen distinto al aerosol marino; en el caso del  $\text{K}^+$  y el  $\text{Ca}^{+2}$  esta fracción representa como mínimo el 90% en los diferentes sitios de muestreo. Sobre el continente, la fracción de  $\text{SO}_4^{2-}$  que no proviene del aerosol marino constituye un trazador de actividades antropogénicas y de quema de combustibles fósiles, el  $\text{K}_{nam}$  se origina mayoritariamente por quema de biomasa mientras que el  $\text{Ca}_{nam}$  tiene un origen predominantemente cristal.

**Figura 5. Contribución del aerosol marino a la composición química de las partículas colectadas en los cinco sitios de monitoreo ubicados en el área metropolitana de Costa Rica, 2009**



Las relaciones elementales en muestras de aerosoles pueden proporcionar información importante para entender su posible origen. De esta forma, los factores de enriquecimiento de los elementos presentes en esta matriz, con respecto a la concentración existente en el material crustal, se suelen calcular con el fin de identificar las posibles fuentes y la contribución de las emisiones antropogénicas a los niveles de metales en las partículas  $PM_{10}$  (Duce et al., 1975). Si el valor del factor de enriquecimiento es cercano a la unidad, el elemento presenta un origen predominantemente crustal. Sin embargo, debido a las diferencias existentes entre la composición crustal en las distintas regiones del planeta, los valores de factor de enriquecimiento comprendidos entre 1-10, se consideran de origen natural. Elementos como el Al, Si, Ti, Fe se usan comúnmente como elemento de referencia para el cálculo de los factores, debido a que son muy abundantes en el material crustal y no son significativamente afectados por la contaminación. En el presente estudio, para estimar dichos factores se utilizó como referencia el Fe y la concentración crustal continental superior se tomó de Taylor y McLennan (1985).

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

$$FE = (E/R) \text{ Aire} / (E/R) \text{ suelo}$$

Donde R es el elemento de referencia. Los valores de factores de enriquecimiento calculados a partir de los datos de concentración de metales, presentes en las partículas colectadas en el área metropolitana de Costa Rica, se muestran en el cuadro 7 y siguen la siguiente secuencia: Pb > Cu > V > Mn > Ni > Fe > Al > Cr para el caso de los sitios ubicados en la ciudad de San José, mientras que para los sitios de Heredia y Belén el Cu presenta factores de enriquecimientos mayores.

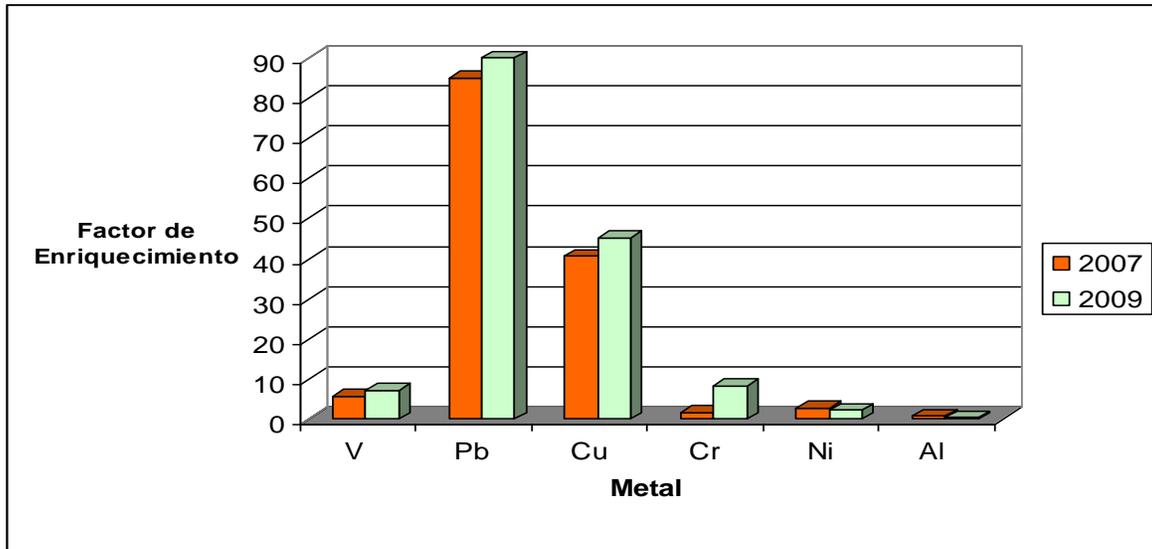
**Cuadro 7. Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas en los sitios de muestreo de partículas PM<sub>10</sub> ubicados en el Área Metropolitana de Costa Rica, 2009.**

<b>Sitio de muestreo</b>	<b>V</b>	<b>Pb</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Mn</b>	<b>Al</b>
CAT-SJ	5,4	84,6	0,5	40,5	2,9	3,4	0,7
JE-SJ	7,6	139,9	0,6	51,4	4,2	4,2	0,4
REC-HE	2,3	51,2	6,1	73,4	2,2	13,2	0,5
RIB-BE	10,8	44	11,5	59,4	8,4	5,4	0,6
AS-BE	6,8	22	10,5	135	2,5	3,4	0,7

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

Si se analiza la evolución de los factores de enriquecimiento (figura 6) registrados para varios metales en las partículas PM<sub>10</sub> colectadas en la ciudad de San José (CAT-SJ) se puede observar un incremento en las contribuciones antropogénicas cercano al 12% anual para metales como Pb, Cu y Cr, si se comparan los valores obtenidos en 2009 con respecto al año 2007.

**Figura 6. Comparación de los factores de enriquecimientos registrados para varios metales en las partículas PM<sub>10</sub> colectadas en el sitio CAT-SJ en 2007 y 2009**



Si se estudia la variación estacional de la composición de las partículas PM<sub>10</sub> (cuadro 8), para los sitios de monitoreo, la concentración de PM<sub>10</sub> resulta ser significativamente menor en época seca, lo anterior debido al hecho de que durante estos meses, la velocidad promedio de los vientos en el área metropolitana aumenta como producto del incremento de los vientos alisios procedentes del Mar Caribe, situación que causa un ascenso en el potencial de remoción de contaminantes en la zona de estudio. Durante la época lluviosa, los vientos alisios disminuyen su intensidad, y permiten el ingreso al área metropolitana de brisas del Pacífico (responsables de la generación de lluvias), causando un descenso en la velocidad del viento cercano al 42% con respecto a la época seca, desfavoreciendo el transporte de contaminantes a otras regiones.

Las especies químicas que tienen un origen que puede ser razonablemente atribuido al efecto del aerosol marino (Na y Cl), poseen una fuerte correlación positiva con la velocidad del viento ocurrida durante el muestreo, tal como se muestra en el cuadro 9. La concentración de estas especies disminuye al descender la velocidad de las corrientes de aire, responsables del arrastre de aerosol marino. Para la mayoría de las especies metálicas analizadas, el comportamiento es inverso debido a que al descender la velocidad de las masas de aire que ingresan al Área Metropolitana, disminuye la capacidad de remover los contaminantes generados en los principales centros urbanos del país.

**Cuadro 8. Concentración promedio de metales e iones inorgánicos presentes en las partículas PM<sub>10</sub> obtenidas, durante la época lluviosa (mayo-noviembre 2009) y seca (enero-abril 2009), para los sitios de monitoreo.**

Concentración (µg/m <sup>3</sup> )	CAT-SJ		REC-HE		RIB-BE	
	Época Seca	Época Lluviosa	Época Seca	Época Lluviosa	Época Seca	Época Lluviosa
PM <sub>10</sub>	24	32	27	47	31	38
Cl <sup>-</sup>	1,45	0,83	1,45	1,45	1,53	1,02
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,88	1,07	0,88	0,88	0,82	0,85
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3,68	3,05	3,68	3,68	2,07	3,45
<b>Metales (ng/m<sup>3</sup>)</b>						
V	4,4	5,9	1,1	2,1	5,4	11,7
Pb	0,9	5,0	4,2	6,7	4,2	6,3
Cr	7,1	12,3	9,8	7,4	6,9	23,5
Ni	0,63	1,52	1,3	1,4	6,9	5,4
K	106	175	0,14	0,15	169	213
Na	670	561	1443	1205	1281	1034
Al	138	193	224	445	384	443
Fe	238	383	363	394	381	447

**Cuadro 9. Coeficientes de correlación de Spearman existente entre las principales especies químicas presentes en las partículas PM<sub>10</sub> y las variables meteorológicas prevalentes durante el muestreo para el sitio CAT-SJ, 2009.**

IONES												
	PM <sub>10</sub>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Na	K	Mg	Ca	VV	T	P	
VV	-0,67	0,74	0,35	-0,38	0,72	0,23	0,27	0,63	1,00			
T	0,31	-0,86	-0,37	0,11	-0,77	-0,50	-0,44	-0,62	-0,72	1,00		
P	0,70	-0,82	0,29	0,25	-0,73	-0,38	-0,33	-0,75	-0,94	0,71	1,00	
METALES PESADOS												
	PM <sub>10</sub>	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Mn	Al	Fe	VV	T	P
VV	-0,64	-0,40	0,38	0,36	0,47	0,54	-0,20	-0,11	-0,22	1,00		
T	0,32	0,32	0,45	-0,51	-0,31	0,60	0,49	0,34	0,34	-0,76	1,00	
P	0,74	0,69	0,59	-0,23	0,36	0,68	0,79	0,85	0,87	-0,93	0,77	1,00

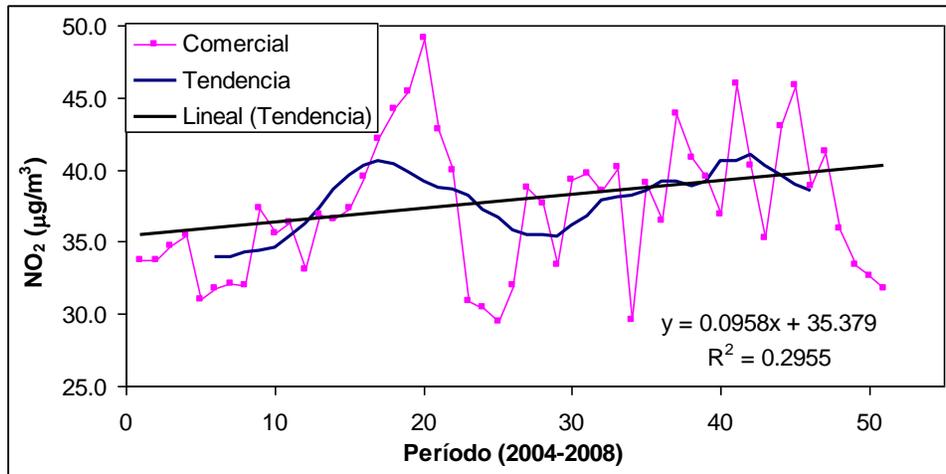
VV: Velocidad del viento, T: Temperatura, P: Precipitación. Los números en negrillas representan correlaciones significativas a  $p < 0,05$ ,  $N = 25$ .

Tal como se mencionó anteriormente, otro de los contaminantes monitoreados, en el área metropolitana es el dióxido de nitrógeno. Si se analiza la tendencia de los datos a través de los años de monitoreo se pueden observar que para los sitios de alto flujo vehicular ubicados en las zonas comerciales de la ciudad se presentan tasas de crecimiento cercanas al 10%. Si las tendencias registradas para los niveles de dióxido de nitrógeno en la ciudad de San José se comparan con las correspondientes a la ciudad de Heredia (figura 7), segunda ciudad en importancia en el país, se puede notar que la tasa de crecimiento para los sectores comerciales de Heredia es casi el doble que la obtenida

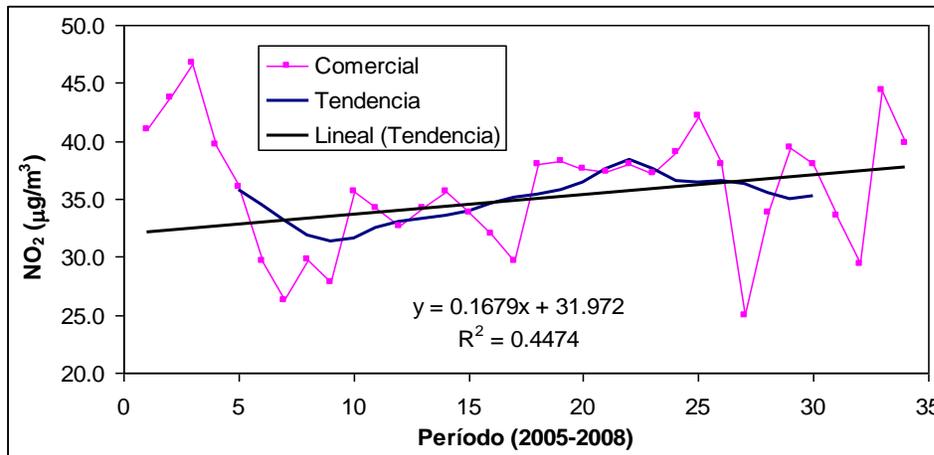
para la ciudad de San José, esto eventualmente podría sugerir el efecto positivo de la restricción vehicular que opera en la ciudad de San José desde hace dos años.

**Figura 7. Tendencias de la concentración de dióxido de nitrógeno para los sectores comerciales en las ciudades de San José y Heredia.**

(a) San José



(a) Heredia



Un importante esfuerzo realizado en materia de gestión de la calidad del aire es la realización, durante el año 2010, del primer inventario de emisiones del Área Metropolitana de Costa Rica, elaborado por el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional para la Comisión Interinstitucional de Gestión de la Calidad del Aire (UNA-MINAET-MINSALUD-MOPT-Municipalidad de San José) gracias al financiamiento del Acuerdo de Cooperación USAID-Comisión Centroamericana de

Ambiente y Desarrollo. Un inventario de emisiones es un instrumento estratégico para la gestión de la calidad del aire, que permite conocer las fuentes emisoras de contaminantes, así como el tipo y cantidad de contaminantes que se emite de cada una de ellas. Lo anterior con el fin de diseñar las medidas más pertinentes para controlar y reducir la contaminación atmosférica, protegiendo la salud de los habitantes de los centros urbanos.

Este inventario hace una estimación de las emisiones generadas durante el año 2007 en 31 cantones del Área Metropolitana de Costa Rica, a saber: Alajuela, Poás, Atenas, Grecia, Cartago, Oreamuno, Paraíso, La Unión, El Guarco, Heredia, Belén, Flores, Santa Bárbara, Barba, San Rafael, San Isidro, San Pablo, Santo Domingo, Santa Ana, Escazú, Alajuelita, San José, Moravia, Goicoechea, Vasquez de Coronado, Curridabat, Montes de Oca, Tibás, Mora, Aserri, Desamparados. Los contaminantes incluidos en este inventario son aquellos catalogados como contaminantes criterio del aire (son los contaminantes que están regulados por una norma que define los niveles de concentración en el aire recomendables para la protección de la salud humana) e incluyen: Partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>), Monóxido de carbono (CO), Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), Óxidos de nitrógeno (NOx), Gases Orgánicos Totales (GOT), Gases Orgánicos Reactivos y Amoníaco.

Las fuentes consideradas en este inventario contemplan: fuentes móviles (automóviles particulares, autobuses, taxis, motocicletas, vehículos de carga liviana, carga pesada, etc), fuentes fijas (industrias que poseen más de 40 empleados), fuentes de área (establecimientos comerciales que por sí solos poseen emisiones insignificantes pero que son muy numerosos) y fuentes naturales (emisiones de los suelos y los bosques).

Durante el año 2007, en el Área Metropolitana de Costa Rica se generaron 457 402 toneladas de contaminantes criterio de origen antropogénico, de los cuales un 56% provienen de fuentes móviles, 21% de fuentes fijas y 23% de fuentes de área. El contaminante más emitido es el monóxido de carbono (resultante de la combustión incompleta) representando un 41,2% del total de los contaminantes generados.

Luego de las fuentes naturales, las fuentes móviles en especial los autos particulares, los vehículos de carga liviana y los autobuses son los principales emisores de NOx, seguidas de las fuentes fijas. En conjunto, estas cuatro categorías de fuentes producen alrededor de 84,9 por ciento de las emisiones totales de NOx descontando las emisiones de fuentes naturales.

Las industrias de transformación de minerales, seguidas de las centrales termoeléctricas y el consumo industrial de combustibles (fuente de área) emiten aproximadamente 97 por ciento de las emisiones totales de SO<sub>2</sub> del inventario.

Después de las fuentes naturales, la utilización de solventes, los vehículos automotores que circulan por carreteras y la distribución de combustibles (gasolina y gas LP) son los principales responsables de las emisiones de GOR. Aunque estas tres categorías emiten sólo alrededor de 9 por ciento del total de GOR del inventario,

su contribución se eleva por arriba de 65 por ciento si se excluyen las emisiones de fuentes naturales.

Las emisiones de CO provienen principalmente de los vehículos automotores: más de 96,7 por ciento del total del inventario para este contaminante. El segundo lugar corresponde al consumo de combustibles fósiles en procesos de combustión en fuentes fijas.

Las emisiones de PM10 y PM2.5 provienen principalmente del polvo fugitivo (resuspensión de polvo de los caminos pavimentados y no pavimentados), el manejo de residuos y las actividades agrícolas (fuentes de área), que contribuyen con más de 64 por ciento del total de PM10 y 40 por ciento del total de PM2.5 del inventario. Después del polvo fugitivo, los procesos de manufactura y otros procesos industriales, y las plantas de generación de electricidad son las fuentes con mayores emisiones de PM10 y PM2.5. Estas dos categorías emiten sólo alrededor de 25,8 por ciento del total de PM10 y 15,2 por ciento del total de PM2.5 del inventario.

Las actividades ganaderas y la generación doméstica de amoníaco, junto con la aplicación de fertilizantes, son responsables de la mayoría de las emisiones de NH<sub>3</sub> en el Área Metropolitana del país. La combustión industrial de combustibles y los vehículos automotores contribuyen con una muy pequeña proporción a las emisiones de este contaminante.

Para las fuentes móviles, calcular las emisiones por año modelo adquiere vital importancia cuando se toma en cuenta que los vehículos viejos presentan mayor cantidad de emisiones en todos los contaminantes por no contar con tecnologías apropiadas, así por ejemplo el 45% de los vehículos (años modelos 1993 y anteriores), emite el 62% de los gases orgánicos reactivos y el 42% de los óxidos de nitrógeno.

En las fuentes de área sobresalen las emisiones de GOT, donde el 68% se genera por la degradación de residuos sólidos dispuestos en los rellenos sanitarios, metano en su mayoría (72%); otra cantidad importante de COT proviene de los diferentes productos comerciales utilizados para el cuidado personal, de los adhesivos y selladores, catalogados como *uso de solvente*, los cuales en conjunto emiten el 27%. Por el almacenamiento, transporte y uso de derivados del petróleo, se emitió el 2%, en su mayoría por emisiones evaporativas generadas por componentes de la gasolina.

## **Bibliografía:**

Alfaro, M.R. 1999. Informe Técnico sobre la Calidad del Aire en Costa Rica. Convenio UNA-SwissContact. Costa Rica

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

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

Bhaduri. B.. Minner. M.. Tatalovich. S.. Harbor. J.. 2001. Long-term hydrologic impact of urbanization: A table of two models. *Journal of Water Resources Planning and Management* 127 (1). 13–19.

Bricker OP. Jones BF. Main factors affecting the composition of natural waters. In: Salbu B. Steinnes E. editors. *Trace elements in natural waters*. Boca Raton7 CRC Press; 1995. p. 1 – 5.

Campbell. D.. Bergman. M.. Brody. R.. Keller. A.. Livingston-Way. P.. Morris. F.. Watkins. B.. 1993. SWIM Plan for the Lower St. Johns River Basin. St. River Water Management District. Palatka. Florida.

Chelala, C. (1999). *Impacto del ambiente sobre la salud infantil*. Organización Panamericana de la Salud. Washington, D.C., USA [Disponible en <http://www.paho.org/spanish/hep/infancia.pdf>].

Cohen, A. J.; Anderson, H. R.; Ostro, B.; Dev Pandey, K.; Krzyzanowsky, M.; Künzli, N.; Gutschmidt, K.; Pope III, C. A.; Romieu, I.; Samet, J. M.; Smith, K. R. (2004). "Global and Regional Burden of Diseases Attributable to Selected Major Risk Factors". *Comparative Quantification of Health Risks*. Organización Mundial de la Salud. Suiza.

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

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

Guleda. O.E.. Ibrahim. D.. Halil. H.. 2004. Assessment of urban air quality in Istanbul using fuzzy synthetic evaluation. *Atmospheric Environment* 38 (23). 3809–3815.

Herrera, J., Rodríguez. S., 2007. Cuarto Informe de Calidad del Aire de la ciudad de San José (2007), informe técnico, pp 15-16.

Kowalkowski. T.. Zbytniewski. R.. Szpejna. J.. Buszewski. B.. 2006. Application of chemometrics in river water classification. *Water Research* 40 (4). 744–752.

Liu. C.W.. Lin. K.H.. Kuo. Y.M.. 2003. Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a Blackfoot disease area in Taiwan. *Science in the Total Environment* 313 (1-3). 77–89.

Organización Mundial de la Salud. (2006a). *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)].

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

Ren. W.. Zhong. Y.. Meligrana. L.. Anderson. B.. Watt. W.E.. Chen. J.. Leung. H.L.. 2003. Urbanization. land use. and water quality in Shanghai 1947-1996. *Environment International* 29 (5). 649–659.

Tabachnick. B.G.. Fidell. L.S.. 2001. *Using Multivariate Statistics.* Allyn and Bacon. Boston. MA.

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

Xian. G.. Crane. M.. Junshan. S.. 2007. An analysis of urban development and its environmental impact on the Tampa Bay watershed. *Journal of Environmental Management* 85 (4). 965–976.

Xiao, H., Liu, C., 2004. Chemical characteristics of water soluble components in TSP over Guiyang, SW China, 2003. *Atmospheric Environment* 38, 6297–6306.

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