

Evolución de la contaminación del aire en la ciudad de San José, Costa Rica: 2004-2008

Fecha de recepción: 05/04/2010

Fecha de aceptación: 14/06/2010

Jorge Herrera Murillo¹
Susana Rodríguez Román²
José Félix Rojas Marín³

Palabras clave

PM₁₀, dióxido de nitrógeno, contaminación del aire, ciudad de San José.

Resumen

Se evaluaron los promedios mensuales de dos contaminantes criterio, medidos en la ciudad de San José, durante el periodo 2004-2008: partículas PM₁₀ y dióxido de nitrógeno. Al analizar las tendencias, se puede observar que en el caso de las partículas, la tasa de crecimiento anual se encuentra por debajo del 3%, o negativa en el caso de la Catedral Metropolitana, esto puede deberse al efecto positivo por la revisión técnica vehicular y la mejora en la calidad de los combustibles. Sin embargo, en el caso del dióxido de nitrógeno, se presentan tasas de crecimiento anual

cercanas al 10% para zonas comerciales e industriales de la ciudad.

Key words

Particulate Matter PM₁₀, Nitrogen Dioxide, air pollution, city of San José.

Abstract

Monthly averages of two criteria pollutants was measured in the city of San Jose, during the years 2004-2008: PM₁₀ and nitrogen dioxide. Trend analysis can be seen that in the case of particles, the annual growth rate is below 3% or negative in the case of the Metropolitan Cathedral, which may be due to the positive effect of the technical review vehicular and improvement in fuel quality. However in the case of nitrogen dioxide, there was an

1. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado 86 3000 Heredia, Costa Rica. Tel (506) 2277-3292. Correo electrónico: jherrer@una.ac.cr.
2. Escuela de Química, Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica. Tel (506) 2511-5376. Correo electrónico: susanar@cariari.ucr.ac.cr.
3. Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Campus Omar Dengo, Apartado 86-3000 Heredia, Costa Rica. Tel (506) 2277-3292. Correo electrónico: jfrojasm60@yahoo.com.

annual growth rates of around 10% for commercial and industrial areas of the city.

Introducción

La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera, altere o modifique su composición y condición natural (INE, 2000). De acuerdo con las leyes físicas, la contaminación se puede asimilar, transformar o eliminar, de tal modo que los sistemas permanecen en equilibrio. Sin embargo, en muchos casos las emisiones de grandes cantidades de sustancias a la atmósfera han rebasado la capacidad de equilibrio de este sistema, ocasionando con ello la alteración del ambiente natural (Kathryn *et ál*; 2004).

La contaminación atmosférica, a diferencia de otros problemas ambientales como la contaminación del suelo por sustancias tóxicas, en muchos casos, puede percibirse con facilidad, especialmente en los conglomerados urbanos. Sin embargo, más allá de ver el aire sucio, es necesario evaluar de manera cuantitativa su calidad, por medio de la medición de los niveles en los que se presentan, tanto espacial como temporalmente, los contaminantes, los cuales tienen efectos sobre la salud. Los contaminantes atmosféricos más importantes que se monitorean comúnmente son: SO₂, CO, PST, PM₁₀, ozono y óxidos de nitrógeno (NOx).

Estos son conocidos como contaminantes criterio, para los cuales existen normas de calidad del aire. La finalidad de las normas es proteger la salud humana (normas primarias), así como el bienestar del ser humano y los ecosistemas (normas secundarias). En Costa Rica existe el Decreto 30221-Salud *Reglamento sobre Inmisión de Contaminantes Atmosféricos*, publicado el 21 del marzo del 2002,

en el alcance 25 del Diario Oficial *La Gaceta*, el cual contiene las normas nacionales de calidad del aire. Estas establecen las concentraciones máximas de contaminantes en el ambiente, que no debieran sobrepasarse, para garantizar la adecuada protección a la salud de la población, inclusive la de los grupos más susceptibles como niños, ancianos y personas con enfermedades respiratorias crónicas, entre otros.

Al comparar las mediciones con las normas nacionales e internacionales, se puede determinar si la calidad del aire es satisfactoria o no, y en este último caso establecer programas de control acordes con la severidad del problema. El análisis de tendencias de la calidad del aire a lo largo de los años permite inferir si existe un problema de deterioro creciente o una mejoría paulatina para cada uno de los contaminantes estudiados. Sin duda, estas tendencias constituyen el mejor indicador disponible para evaluar si una ciudad se aproxima o se aleja de lo que puede considerarse como *sustentable* en materia de calidad del aire.

La ciudad de San José, al igual que muchas otras ciudades latinoamericanas, ha presentado un crecimiento urbano histórico de forma radial, o sea, se están generando nuevas áreas en adición a las que ya gravitan sobre las infraestructuras urbanas existentes, cuyas características son inadecuadas para atender las nuevas necesidades y cuya readaptación resulta extremadamente costosa. Este proceso, acompañado con la gran descoordinación entre diferentes actores urbanos, hace cada día más deficiente la operación de la ciudad, provocando un incremento desmedido del tráfico vehicular, que ha traído como consecuencia un deterioro considerable en la calidad del aire que se respira.

La Universidad Nacional, en cooperación con la Municipalidad de San José, el Ministerio de Salud y el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones de Costa

De acuerdo con las leyes físicas, la contaminación se puede asimilar, transformar o eliminar, de tal modo que los sistemas permanecen en equilibrio. Sin embargo, en muchos casos, las emisiones de grandes cantidades de sustancias a la atmósfera han rebasado la capacidad de equilibrio de este sistema, ocasionando con ello la alteración del ambiente natural.

Rica, lleva a cabo, en forma ininterrumpida, el monitoreo de PM_{10} y dióxido de nitrógeno en el ciudad de San José desde el 2004. En el presente artículo se analizarán las principales tendencias de dichos contaminantes en los últimos cuatro años, con el fin de valorar la eficiencia de las medidas tomadas hasta el momento y los grandes retos existentes en materia de la gestión de la calidad del aire en dicha ciudad.

Metodología

PM_{10}

Para realizar el muestreo de partículas PM_{10} , se seleccionaron dos sitios de monitoreo, ubicados en las instalaciones de la Catedral Metropolitana de San José (10 m de la carretera y 3 m sobre el nivel del suelo) y la Junta de Educación de San José (12 m de la avenida y 3,5 m sobre el nivel del suelo), en el cantón de San José. Los sitios determinados se caracterizan

por ser categoría B, de acuerdo con la clasificación de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Usepa, 2004). La categoría B se asigna a aquellos sitios donde se presenta alta concentración de contaminantes con bajo potencial de acumulación, ubicado de 3 a 15m de una arteria del alto flujo vehicular con buena ventilación natural. En la figura 1 se muestra la distribución espacial de los sitios de muestreo.

Para la recolección de las muestras se utilizaron dos muestreadores de aire de alto volumen, marca Thermo Andersen, modelo MFC, en donde el aire ambiente es aspirado en forma simétrica (independientemente de la dirección del viento), durante 24 ± 1 horas. Una vez cada tres muestreos se realizó una curva de calibración del flujo de cada uno de los muestreadores de aire, comparando las lecturas de caída de presión generadas por el flujo al pasar por un orificio crítico calibrado Variflo modelo

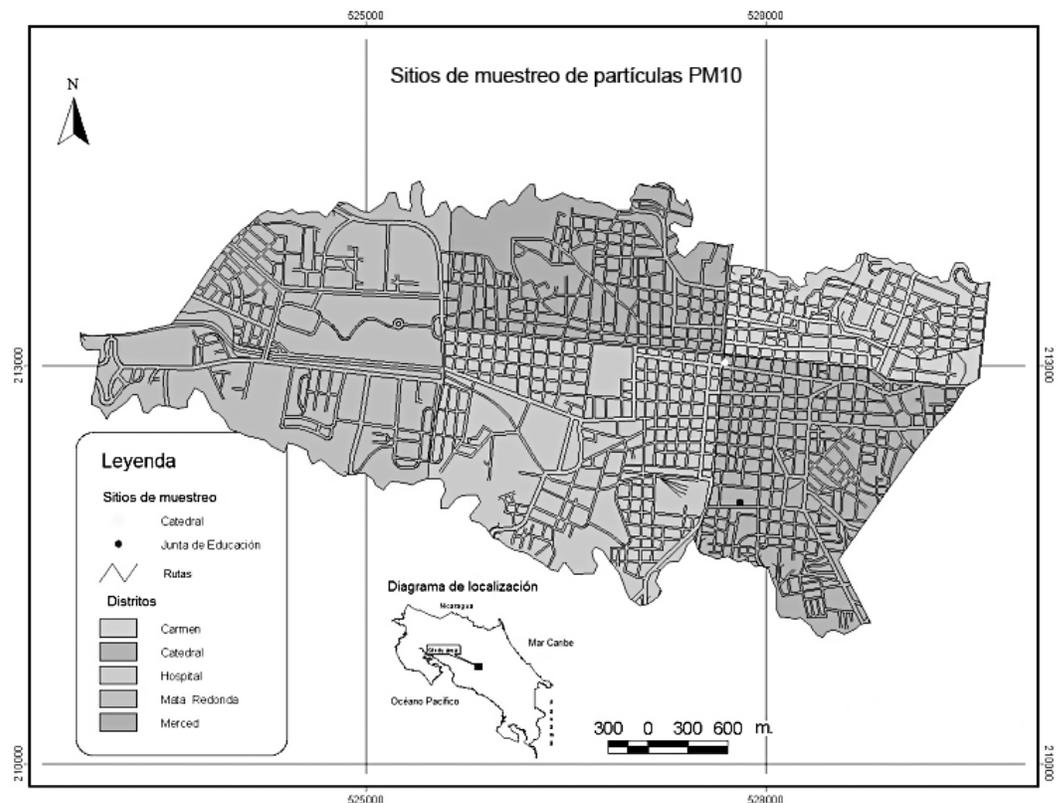


Figura 1. Diagrama de ubicación de los sitios de muestreo de PM_{10} en la ciudad de San José, Costa Rica, durante el periodo 2004-2008.

454, con respecto a las indicaciones del equipo.

Las mediciones de caída de presión se realizaron con dos manómetros de agua, calibrados y conectados al orificio y al equipo respectivamente. Para cada uno de los muestreos se tomaron registros de las condiciones de temperatura y presión atmosférica con la ayuda de un anemómetro marca Kestrel, modelo 5000, para, posteriormente, realizar las correcciones de volumen a 1 atm de presión y 25°C de temperatura. En la colección de las partículas, se utilizaron filtros de fibra de vidrio marca Whatman CAT N.º 1829-932. Dichos filtros se acondicionaron al menos 24 horas en una desecadora bajo las siguientes condiciones: temperatura 15-30°C y humedad menor al 40%, antes de ser pesados en la balanza analítica, al inicio y después de la conclusión de los muestreos.

Dióxido de nitrógeno

Preparación de los muestreadores pasivos

Para la preparación de los colectores, se sumergen mallas de acero de 11 mm de diámetro (superficie de absorción) en una disolución formada a partir de la mezcla de trietanolamina con acetona (relación 1:8) durante al menos 24 horas. Una vez impregnadas las mallas con la disolución absorbente, estas se colocan en el interior de una tapa, la cual se acopla a un tubo

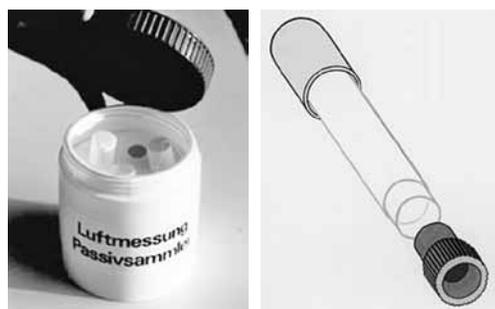


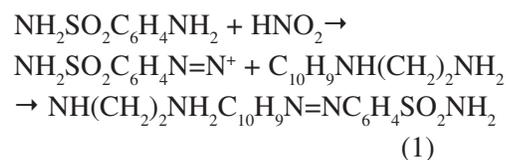
Figura 2. Esquema del colector pasivo para la determinación de dióxido de nitrógeno.

colector de polipropileno (diámetro interno 9,5 mm y largo 7,4 cm) (figura 2). Los tubos se colocan en contenedores de PVC, en grupos de 4 o 6, con el fin de proteger los colectores. Los contenedores de PVC se ubican en postes del tendido eléctrico a una altura no menor a los 3 m con respecto al nivel del suelo.

Los tubos se exponen en el sitio de muestreo por un plazo de 22 a 30 días a fin de ser trasladados al laboratorio para su análisis.

Análisis del contaminante colectado en los tubos pasivos

Una vez expuestos los tubos, se remueve la tapa y se colocan las mallas en un vial de vidrio de 15 mL. Posteriormente, se agregan 5 mL del reactivo de color (N- naftiletildiamina + sulfanilamida). Se tapa el frasco y se agita, y se deja reposar por un mínimo de 15 minutos. El dióxido de nitrógeno colectado en forma de NO_2^- , por medio de la reacción con la trietanolamina, reacciona con el reactivo de color de acuerdo con la siguiente ecuación química:



(fucsia)

El producto de esta reacción es un compuesto coloreado fucsia cuya absorbancia es proporcional a la concentración. Tanto a las muestras como a una curva de calibración compuesta por seis disoluciones patrón de NO_2^- (0 a 1000 $\mu\text{g/L}$), preparadas a partir de la disolución madre de 1000 mg/l, se les mide la absorbancia a 542 nm.

La masa de dióxido de nitrógeno colectada en cada tubo se determina por interpolación en la curva de calibración, a partir de la cual se obtiene la concentración de NO_2^- en el aire, utilizando la ecuación 2:

Cuadro 1. Localización de los sitios de muestreo utilizados en el monitoreo de NO₂ en la ciudad de San José, Costa Rica: 2004-2008.

Sitio	Provincia	Cantón	Tipo de punto	Ubicación exacta
1	San José	Central	Comercial	Hospital San Juan de Dios, Paseo Colón.
2	San José	Central	Comercial	Frente al costado norte de la Catedral Metropolitana, Avenida Segunda.
3	San José	Central	Comercial	150 m norte de la Antigua Estación del Ferrocarril al Pacífico.
4	San José	Central	Comercial	50 m este de la Estación de Servicio La Castellana, Avenida 10.
5	San José	Central	Residencial	Avenida 26, calles 13 y 15, Barrio La Cruz.
6	San José	Central	Residencial	200 m sur de la antigua fábrica Dos Pinos, Barrio Luján.
7	San José	Central	Residencial	50 m sur y 100 este del edificio del Ministerio de Ambiente y Energía, Barrio Francisco Peralta.
8	San José	Central	Comercial	Iglesia Santa Teresita, Barrio Aranjuez.
9	San José	Central	Comercial	Costado sur del Tribunal Supremo de Elecciones de Costa Rica.
10	San José	Central	Comercial	75 m este del edificio del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
11	San José	Central	Comercial	Frente al edificio de la Junta Administradora de Puertos de la Vertiente Atlántica.
12	San José	Central	Residencial	150 m oeste de la Iglesia de Barrio México.
13	San José	Central	Residencial	200 m sur del Parque Salvador, Barrio Pithaya.
14	San José	Central	Industrial	Costado este de las instalaciones de la industria Numar, Barrio Cuba.

$$C = \frac{M \cdot K}{D \cdot t} \quad (2)$$

Donde:

M = masa del contaminante realmente captada

D = coeficiente de difusión del NO₂

T = tiempo de muestreo

K = L/A (relación entre el largo y el ancho del dispositivo de muestreo).

Selección de los sitios de muestreo

Para el monitoreo de los niveles de NO₂ en la ciudad de San José, se seleccionó un total de 14 sitios de muestreo, distribuidos

como se indica en el cuadro 1. Las muestras se colectaron mensualmente durante el periodo 2004-2008.

Resultados y discusión

Partículas PM-10

En el cuadro 2 se presentan la concentración media anual, mínima, máxima y desviación estándar de PM₁₀, obtenida en los dos sitios de monitoreo y construida a partir de los promedios mensuales. Las concentraciones medias del periodo de muestreo no sobrepasan los valores establecidos por el Decreto de Inmisiones

Cuadro 2. Variación de los promedios anuales de la concentración de PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en los dos sitios de muestreo ubicados en la ciudad de San José, durante el periodo 2004-2008.

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

de Contaminantes Atmosféricos de Costa Rica (Decreto 30221-Salud), que establece $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual.

Comparando los valores anuales promedio para los sitios de muestreo, se observa que ambos presentan un comportamiento similar de ascenso y descenso en periodos de dos años; sin embargo, las concentraciones encontradas para el punto en la Junta de Educación siempre permanecen por debajo de los niveles observados en la Catedral Metropolitana. Esta diferencia puede atribuirse al hecho de que la Catedral Metropolitana está ubicada en un sitio de mayor tráfico vehicular y alto congestionamiento vial,

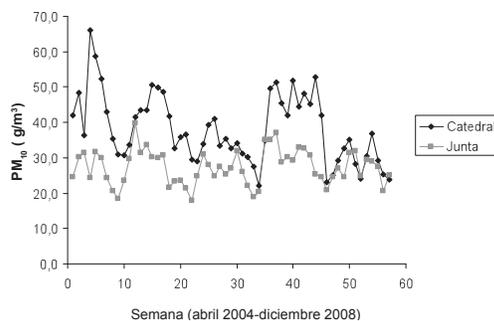


Figura 3. Variación de los promedios mensuales de concentración de PM_{10} para la Catedral Metropolitana y la Junta de Educación, San José, periodo 2004-2008.

en comparación con la Junta de Educación que se encuentra en zona de transición entre el sector comercial y residencial de la ciudad. Para establecer si los datos por sí solos siguen una tendencia en el tiempo y determinar si su comportamiento sigue algún tipo de modelo, primero es necesario analizar los datos más detenidamente mediante los promedios mensuales. En la figura 3, se muestra el comportamiento mensual para los datos obtenidos para la Catedral y la Junta de Educación.

En la aplicación de modelos, existen muchos del tipo determinístico que se usan para evaluar y predecir la dispersión de contaminantes en áreas urbanas, pero la mayoría de estos modelos es “causal” y falla a la hora de predecir concentraciones extremas. Para el análisis de los datos de PM_{10} se seleccionaron dos modelos estadísticos que no son causales y están basados en datos históricos; estos capturan la tendencia estadística pasada de los contaminantes y, de este modo, predicen concentraciones extremas con exactitud razonable (Goyal et al., 2007). Para ambos sitios de muestreo, se aplicaron dos modelos para analizar el comportamiento de la variación de la concentración de partículas en el tiempo.

El primero consistió en un análisis de tendencia en el que se usó regresión lineal;

Catedral PM10 (2004-2008)

Linear Trend Model

$$Y_t = 45,15 - 0,242850 * t$$

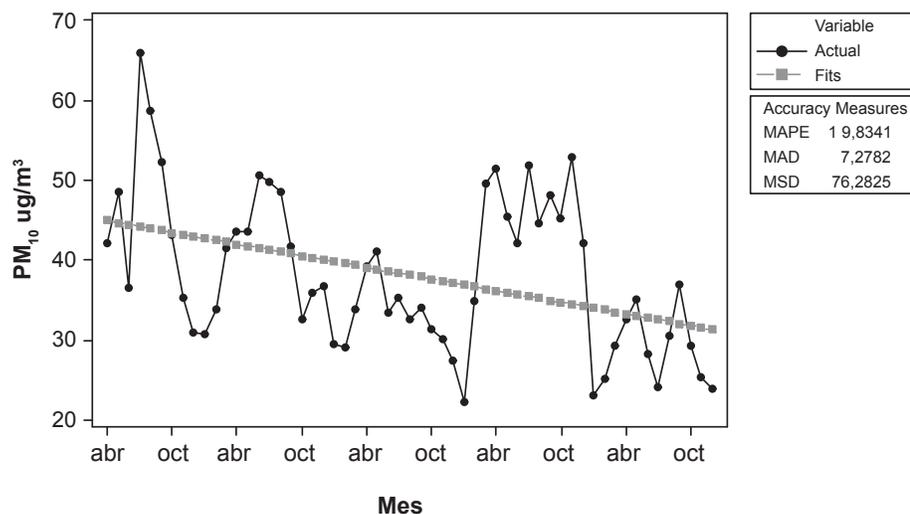


Figura 4. Análisis de tendencia lineal de la concentración de PM₁₀ registrada en la Catedral Metropolitana de San José, en el periodo 2004-2008, utilizando Minitab versión 15.

Junta de Educación

Linear Trend Model

$$Y_t = 27,34 + 0,000467 * t$$

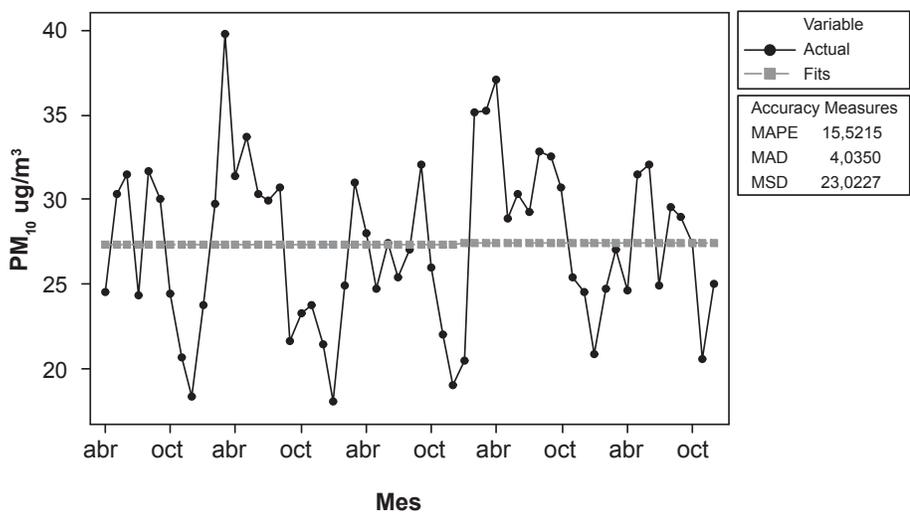


Figura 5. Análisis de tendencia lineal de la concentración de PM₁₀, registrada en la Junta de Educación de San José, en el periodo 2004-2008, utilizando Minitab versión 15.

el segundo, más complejo, está basado en las series de tiempo autoregresivas de promedio móvil integrado de Box-Jenkins, denominado Arima, por sus siglas en inglés. Mientras que el primer modelo hace

una simple extrapolación muy riesgosa si no se cumplen una serie de condiciones, el segundo hace una extracción del comportamiento pronosticable a partir de los datos observados. Para determinar la

bondad de ajuste de los modelos planteados se hizo un análisis del comportamiento de los residuales. El análisis de los datos se realizó con el programa estadístico Minitab versión 15.

Modelo I: tendencia lineal

Aplicando una regresión lineal a los valores obtenidos en el tiempo para la Catedral Metropolitana y la Junta de Educación, se obtuvieron los siguientes gráficos:

A primera vista, la tendencia observada muestra una declinación lineal de los datos de PM_{10} para el caso de la Catedral y una tendencia bastante constante para el caso de la Junta de Educación; sin embargo, antes de asumir estos modelos como válidos, es necesario evaluar qué tan bien se ajustan a los datos. Para que estos modelos de regresión sean válidos se requiere que cumplan la suposición de independencia. Sin embargo, al analizar datos de series temporales, a menudo se rompe esta suposición, lo cual es muy común cuando los términos de error ordenados en el tiempo presentan autocorrelación o un patrón definido (Buseck *et ál.*, 2000). Debido a lo anterior, se aplicó una prueba para determinar la existencia o no de autocorrelación y así decidir si se puede aplicar el modelo. A continuación se muestran las gráficas de autocorrelación para ambos casos estudiados.

Las figuras 6 y 7 muestran que para ambos set de datos se presenta una autocorrelación positiva al observarse un patrón cíclico de los datos. Esto se reafirmó mediante la prueba de Durbin-Watson para autocorrelación positiva de primer orden.

Lo anterior demuestra que existe un factor de estacionalidad en los datos que no puede ser explicado por medio de un modelo de tendencia lineal, por lo cual es necesario utilizar un modelo más complejo, que pueda tomar en cuenta los factores de estacionalidad y autocorrelación de los datos.

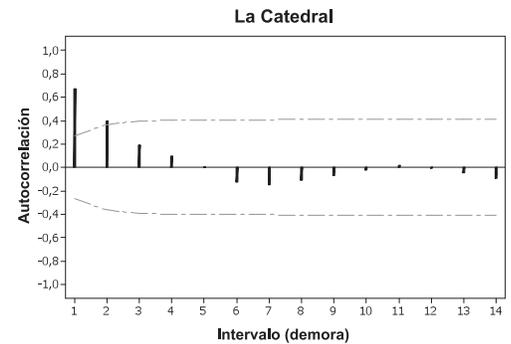


Figura 6. Análisis de autocorrelación para los promedios mensuales de PM_{10} registrados en la Catedral Metropolitana de San José (periodo 2004-2008), utilizando Minitab versión 15.

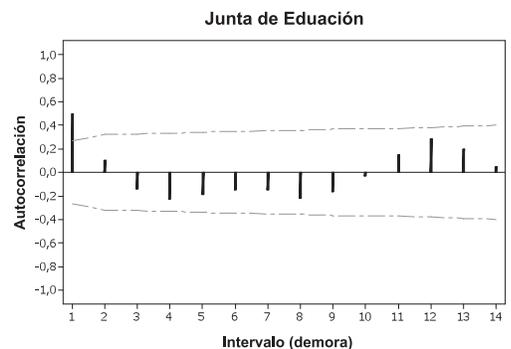


Figura 7. Análisis de autocorrelación para los promedios mensuales de PM_{10} registrados en la Junta de Educación de San José (periodo 2004-2008), utilizando Minitab versión 15.

Modelo II: Arima

En este caso, se aplicó un modelo Arima de orden (1,1,1) a los datos univariados de concentración de PM_{10} para ambos sitios, tomando en cuenta el factor de estacionalidad. Este modelo conlleva a la siguiente ecuación resultante:

$$w_t = \phi_1 w_{t-1} + \alpha_t - \theta_1 \alpha_{t-1} \tag{3}$$

Al aplicar el modelo en Minitab, tomando en cuenta un factor de estacionalidad para comparar el comportamiento de sus predicciones contra los datos observados, se obtuvieron los siguientes resultados para la Junta de Educación de San José:

La gráfica de la figura 8 muestra que, a simple vista, el modelo planteado se ajusta muy bien a los datos observados. Además, en el análisis de los residuales de la figura 9 se puede observar que el ajuste del modelo es aceptable, ya que los residuales están dispersos de forma aleatoria, siguiendo una distribución normal; esto significa que el comportamiento de los datos observados

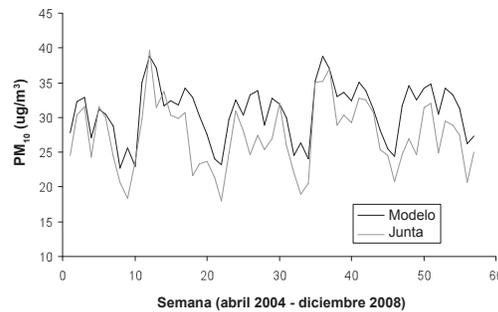


Figura 8. Comparación del modelo ARIMA obtenido con Minitab, contra los datos de PM_{10} observados en la Junta de Educación de San José.

en dicho punto puede explicarse a partir de la variación temporal de estos, sin involucrar variables más complejas, mostrando que el factor estacional es de suma influencia en el comportamiento de las partículas PM_{10} .

Esta observación puede ser justificada por el patrón meteorológico que normalmente se repite cada año; sin embargo, hay que tomar en cuenta que la magnitud de este patrón es muy variable y puede afectar significativamente el modelo si el cambio es muy brusco. Cabe resaltar que la pendiente de la tendencia para el modelo es mayor que la de los datos observados (figura 10); esta es una diferencia donde el modelo magnifica el aumento en los niveles de PM_{10} para los datos pronosticados. No obstante, esto va a obedecer al comportamiento de otra variable importante, como el flujo vehicular en los alrededores del punto.

Gráficas de residuales

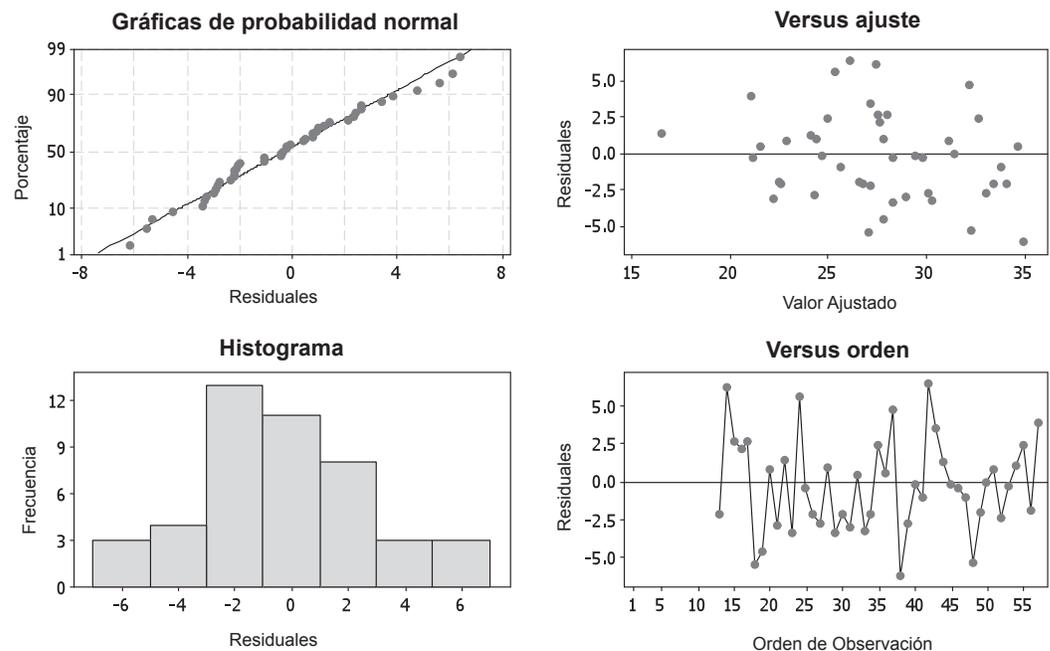


Figura 9. Resultados gráficos del análisis de residuales del ajuste del modelo Arima para los datos de PM_{10} , registrados en la Junta de Educación de San José.

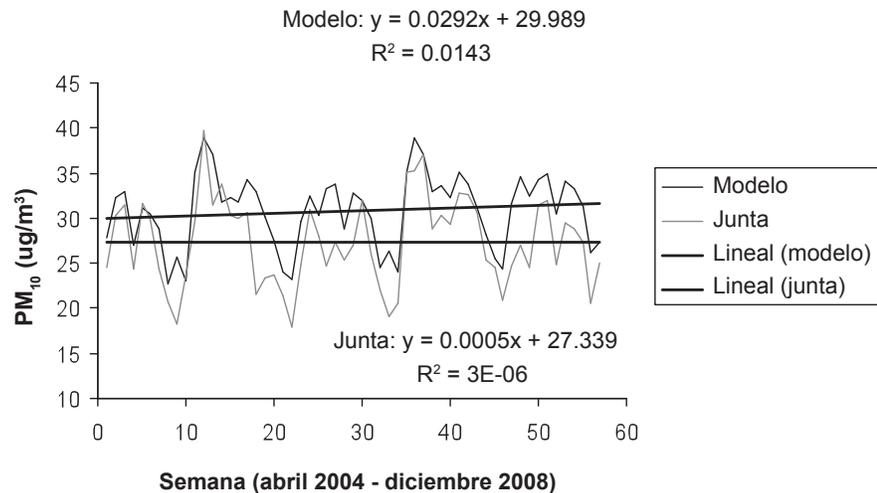


Figura 10. Comparación entre la tendencia lineal del modelo Arima obtenido y los datos observados en la Junta de Educación de San José.

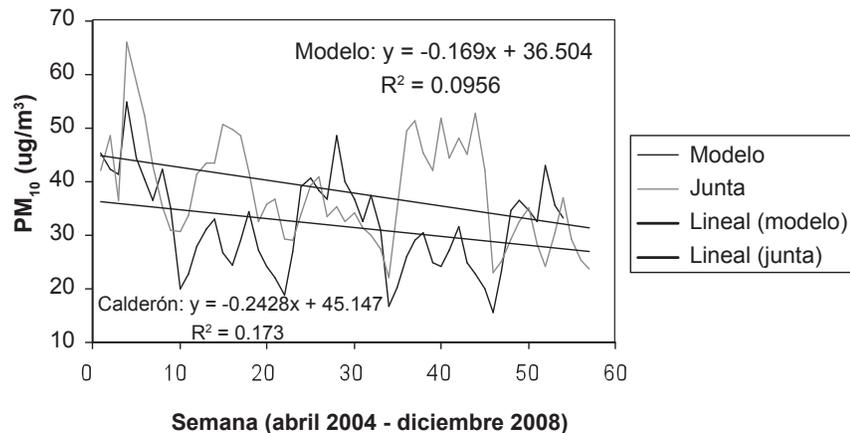


Figura 11. Comparación entre la tendencia lineal del modelo Arima obtenido y los datos observados en la Catedral Metropolitana de San José.

En las figuras 11 y 12 se observan los resultados obtenidos para el modelo estimado para la Catedral Metropolitana.

El modelo sigue el mismo patrón de comportamiento que los datos observados; sin embargo, no coincide muy bien en las magnitudes de los valores extremos, a pesar de que los residuales (figura 12) presentan una distribución aleatoria. En el caso de las tendencias, tanto el modelo como los datos no presentan mayor diferencia en su pendiente decreciente. Por

lo tanto, esto no puede interpretarse como que la concentración vaya a tender a cero, sino que se espera que alcance un mínimo, donde se comporte de forma estacionaria, a menos que ocurran eventos bruscos que puedan disparar las concentraciones.

Dióxido de nitrógeno

En el cuadro 3 se presentan el promedio anual y la desviación estándar de las concentraciones de NO_2 , obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en la ciudad de San José. Tal como se puede

Gráficas de residuales

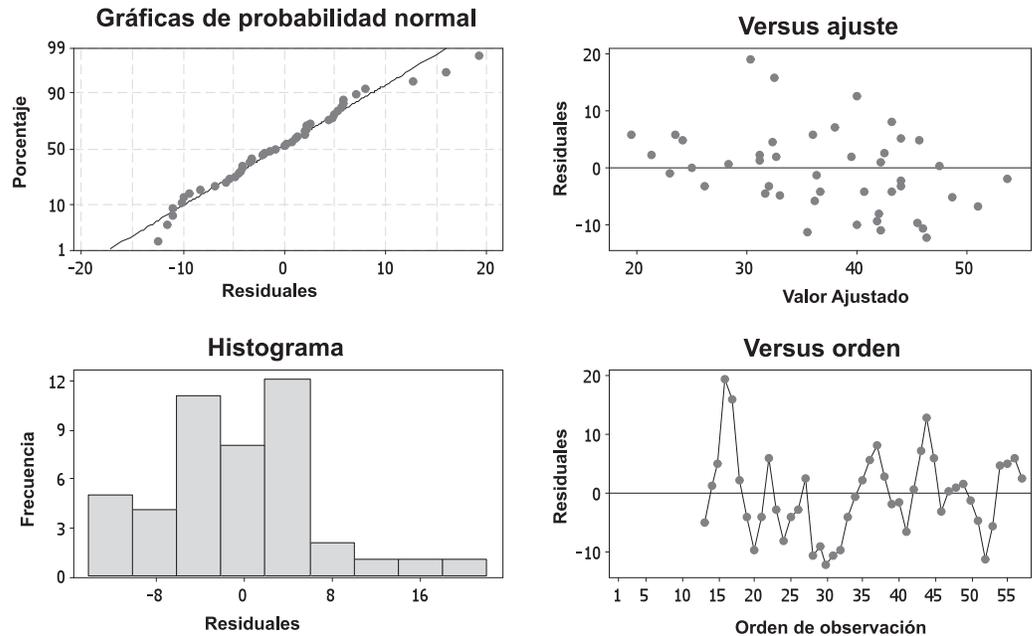


Figura 12. Resultados gráficos del análisis de residuales del ajuste del modelo Arima para los datos de la Catedral de San José.

Cuadro 3. Concentraciones promedio anuales de NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en los sitios de muestreo ubicados en la ciudad de San José, Costa Rica.

Sitio de muestreo	2004	2005	2006	2007	2008
1	46 (5)	48 (6)	51 (3)	56 (10)	55 (11)
2	43 (3)	45 (6)	44 (6)	47 (7)	41 (5)
3	30 (5)	36 (4)	28 (4)	31 (4)	29 (7)
4	41 (5)	45 (11)	43 (8)	51 (6)	47 (10)
5	26 (4)	31 (3)	25 (3)	27 (4)	25 (6)
6	26 (7)	30 (5)	24 (4)	26 (4)	24 (8)
7	27 (9)	31 (5)	27 (8)	27 (5)	23 (5)
8	25 (6)	30 (6)	23 (5)	26 (6)	27 (4)
9	22 (8)	43 (11)	21 (4)	24 (5)	27 (3)
10	33 (10)	42 (3)	39 (4)	40 (5)	44 (7)
11	34 (2)	36 (5)	31 (5)	35 (4)	34 (9)
12	28 (10)	33 (7)	27 (6)	32 (7)	28 (6)
13	24 (6)	32 (7)	26 (7)	29 (7)	31 (5)
14	33 (6)	45 (11)	37 (3)	40 (6)	41(5)

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

notar, al menos cuatro sitios en San José presentan valores mayores a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que corresponde a la norma anual establecida por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante. Es importante aclarar que dichos sitios se encuentran localizados en los principales accesos a la ciudad, además de constituir unas de las vías con mayor flujo vehicular en San José.

Si se agrupan los datos mensuales de concentración de NO_2 de acuerdo con la naturaleza del sitio de muestreo (actividad local) para el caso de San José, tal y como se muestra en la figura 13, se puede observar que las tres categorías (comercial, industrial y residencial) presentan un comportamiento muy similar. Además, es claro que los sectores comerciales e industriales presentan valores muy cercanos de concentración de dióxido de nitrógeno, con datos por encima del límite establecido por la Organización Mundial de la Salud.

Los valores elevados registrados en los sitios comerciales pueden ser atribuidos al alto flujo vehicular que se presenta en dichas zonas. Por otro lado, el sector residencial se diferencia bastante de los otros sectores, puesto que presenta valores significativamente menores. Posteriormente, se estudiaron los promedios móviles para analizar la tendencia histórica (figura 14) que tienen los datos. A simple vista, las tendencias indican un ligero aumento en el promedio histórico para ambos puntos (comercial e industrial), lo cual se debe al congestionamiento cada vez más frecuente en dichos sitios, producto del aumento de la flota vehicular. En cambio, para el sector residencial, la condición histórica tiende ligeramente hacia una disminución en el promedio.

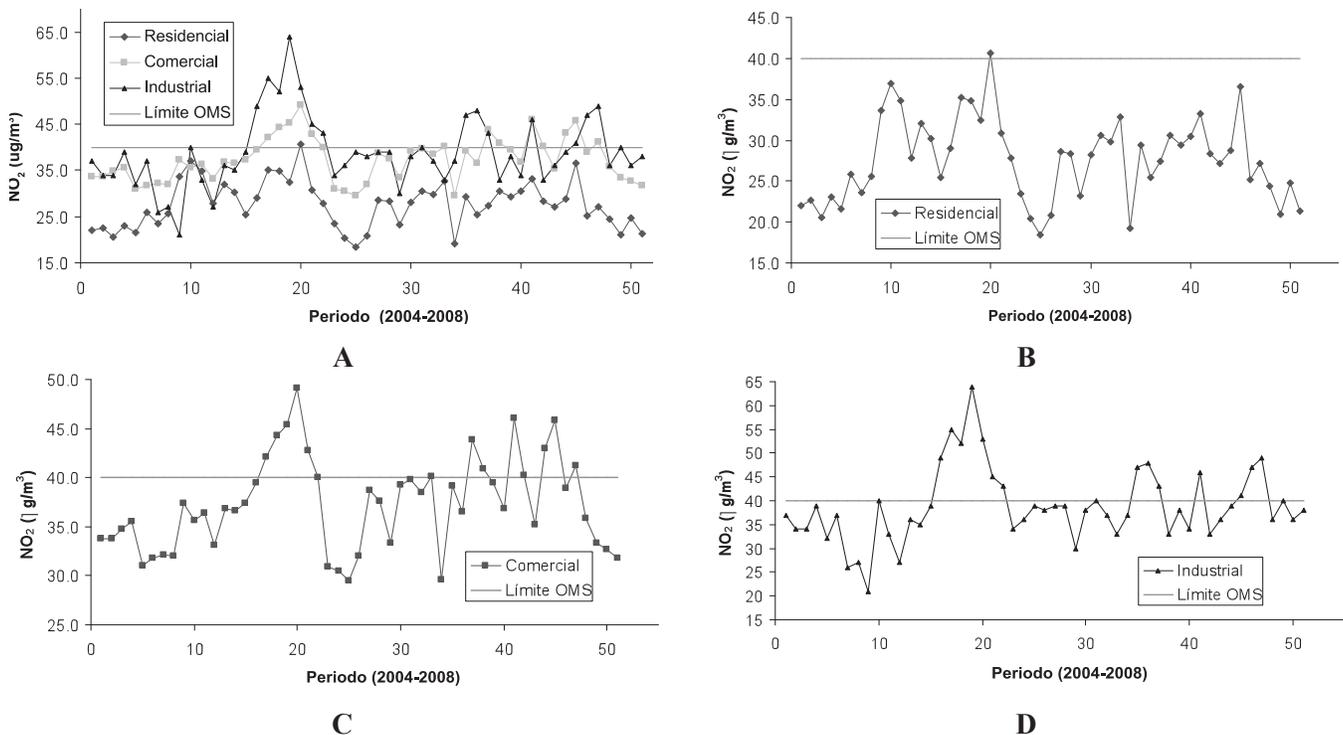


Figura 13. Comparación de niveles de NO_2 registrados en la ciudad de San José para el periodo 2004-2008, por tipo de sitio de muestreo.

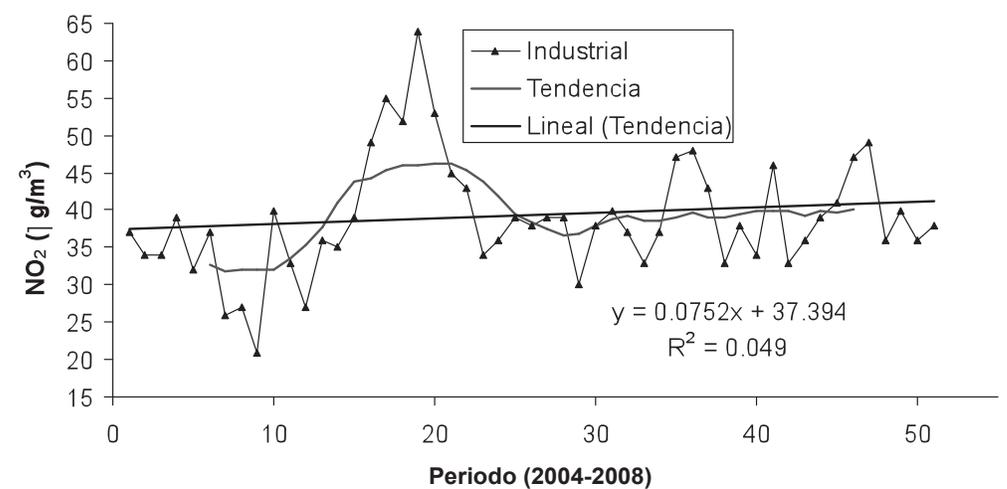
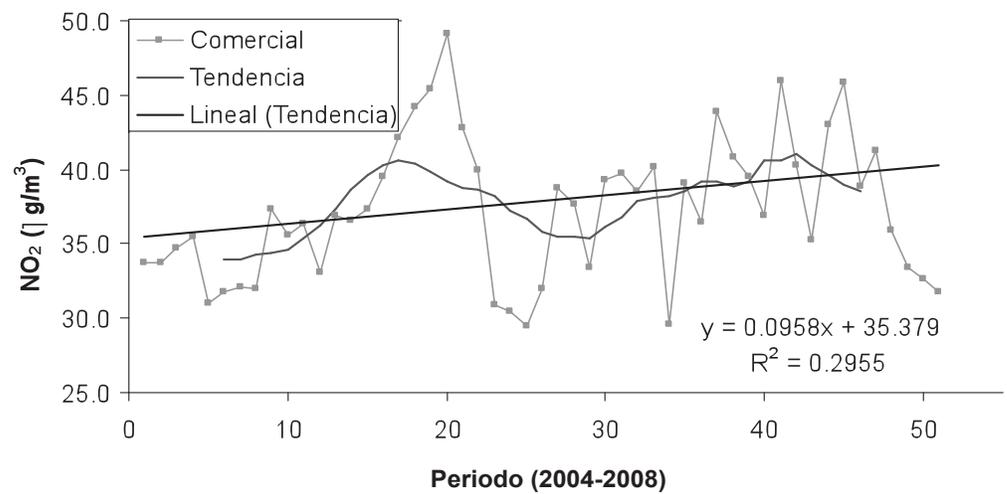
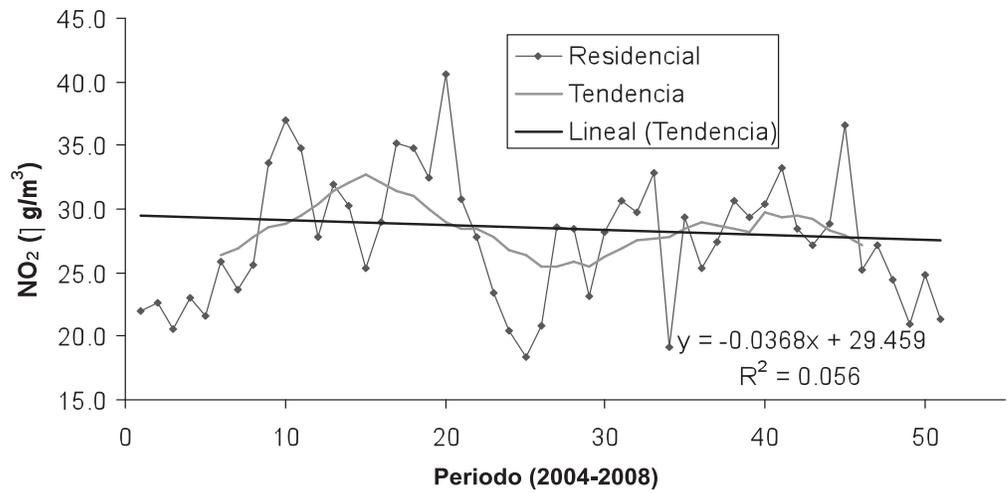


Figura 14. Tendencias de los niveles de NO₂ por tipo de punto de muestreo en la ciudad de San José para el periodo 2004-2008.

Conclusiones

Los datos de concentración de PM_{10} registrados en la ciudad de San José muestran una tendencia relativamente constante en el caso de la Junta de Educación, y en el caso de la Catedral Metropolitana, a la baja, a una tasa del 17% anual, lo cual se puede deber a la implementación del sistema de revisión técnica vehicular y a los esfuerzos sostenidos en la mejora de la calidad de los combustibles, ya que repercuten directamente sobre las emisiones de partículas en las fuentes móviles.

Para el caso del dióxido de nitrógeno, la aplicación de la metodología de muestreo pasivo en la ciudad de San José ha permitido analizar la evolución histórica de los niveles de NO_2 , determinando que al menos en cuatro sitios de la ciudad se obtienen valores que superan la norma de la Organización Mundial de la Salud, principalmente en zonas comerciales con alto flujo vehicular, en donde la tendencia anual, en el periodo 2004-2008, ha sido al alza, a una tasa promedio cercana al 10%. Por lo tanto, es recomendable generar políticas públicas tendientes a mejorar la vialidad en estos puntos y permitir una mayor sostenibilidad del crecimiento urbano, sin causar deterioro a la salud de sus habitantes.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de los funcionarios de la Municipalidad de San José y al Ministerio de Salud de Costa Rica por la colaboración en la toma de muestras durante el monitoreo.

Bibliografía

- Buseck, P.R.; Jacob, D.J.; Posfai, M.; Li, J., Anderson; J.R. (2000). *Minerals in the air: an environmental perspective. International Geology Review* 42 (7), 577–593.
- Goyal P. (2006). *Statistical models for the prediction of respirable suspended particulate matter in urban cities. Atmospheric Environment* 40: 2068-2077.
- Instituto Nacional de Ecología, (2000). *Gestión de Calidad del Aire en México*. SEMARNAT, México.
- Conko, K; Rice, Kare; Kennedy, M. (2004). *Atmospheric wet deposition of trace elements to a suburban environment, Reston, Virginia, USA. Atmospheric Environment* 38: 4025:4033.
- US Environmental Protection Agency. (2004). *Air quality for particulate matter and sulfur oxides*. Research Triangle Park , NC: Office of Health and Environmental Assessment ; EPA report no. EPA-600/8-82-029aF-cF. 3v. 2004.