



Informe

3

PROGRAMA OBSERVATORIO AMBIENTAL

Municipalidad de Belén-Universidad Nacional



La Calidad del Aire en Belén

Informe 2010 de estado y tendencias

Presentación

La Municipalidad de Belén trabaja en forma permanente para asegurar a los ciudadanos que habitan el cantón su derecho a gozar de un ambiente adecuado para su desarrollo, salud y bienestar. Por lo anterior, es una prioridad para esta institución, reforzar y perfeccionar el monitoreo atmosférico, dando continuidad a los esfuerzos iniciados en el año de 2007, consistentes en el fortalecimiento, ampliación y operación de una Red de Monitoreo de la Calidad del Aire para el Cantón de Belén coordinando esfuerzos para ello, con el Laboratorio de Análisis Ambiental de la Universidad Nacional, institución con la cual se mantiene un programa de cooperación interinstitucional denominado: “Programa Observatorio Ambiental del Cantón de Belén”.

El monitoreo atmosférico es uno de los indicadores principales de la calidad del aire y representa una valiosa herramienta de gestión para instrumentar acciones de prevención y control de los contaminantes presentes en la atmósfera ante condiciones que ponen en riesgo la salud de los ciudadanos. Además, es una fuente de información para la ciudadanía sobre los niveles de contaminación existentes en su comunidad.

El presente informe simboliza el esfuerzo realizado con el proceso de mejora continua en operación y análisis de datos, así como el compromiso de seguir perfeccionando los métodos y procedimientos que permitan dar a conocer de una manera sencilla el estado actual de la calidad del aire en el cantón y mantener informada a la población.

.El presente documento ofrece una descripción del estado que guarda la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire del Cantón de Belén; también describe el procedimiento realizado para el análisis del estado y tendencias de los contaminantes monitoreados en cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico, plasmando conclusiones por cada contaminante monitoreado en la red.

Ing. Horacio Alvarado Bogantes
Alcalde Municipal

La Calidad del Aire en Belén

Informe 2010 de estado y tendencias

Ing. Horacio Alvarado Bogantes
Alcalde Municipalidad de Belén

Licda. Sandra León Coto
Rectora Universidad Nacional

Lic. Esteban Ávila Fuentes
Coordinador de la Unidad Ambiental
Municipalidad de Belén

Dr. Jorge Herrera Murillo
Coordinador del Laboratorio de Análisis Ambiental
Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional

Elaborado por el Laboratorio de Análisis Ambiental, Escuela de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional, en el marco del Programa Observatorio Ambiental, Municipalidad de Belén-Universidad Nacional, con la colaboración de:

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

1. Contaminantes Monitoreados

1.1. Partículas PM_{10} y $PM_{2,5}$

1.1.1. Descripción:

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

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

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

con problemas respiratorios, cardíacos y los asmáticos son más sensibles a los daños por partículas. Las partículas más pequeñas representan un mayor riesgo para la población, ya que su tamaño permite que penetren más fácilmente hasta las regiones profundas del tracto respiratorio y contienen una gran proporción de metales tóxicos y compuestos orgánicos de gran toxicidad.

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

1.1.2 Metodología de muestreo:

Para el muestreo de partículas, la Red de Monitoreo Atmosférico del Cantón de Belén cuenta con dos sitios para PM₁₀ y un sitio PM_{2,5} de acuerdo con la información contenida en la tabla 1.

Tabla 1. Sitios de monitoreo para partículas suspendidas en el Cantón de Belén.

Código	Distrito	Ubicación	Contaminante	Técnica de muestreo
BE-01	La Ribera	Centro Comercial La Ribera	PM ₁₀	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana
BE-02	La Asunción	Instalaciones de la Empresa Intermodal	PM ₁₀ , PM _{2,5}	Alto Volumen Manual, muestreo de 24 horas, tres veces por semana

Para la colección de las muestras se utilizan muestreadores de aire de alto volumen marca Thermo Andersen modelo MFC. Una vez cada tres muestreos, se realizó una curva de calibración del flujo de cada uno de los muestreadores de aire comparando las lecturas de caída de presión generadas por el flujo al pasar por un orificio crítico calibrado VARIFLO modelo 454, con respecto a las indicaciones del equipo. Para cada uno de los muestreos se tomaron registros de las condiciones de temperatura y presión atmosférica, para posteriormente realizar las correcciones de volumen a 1 atm de presión y 25°C de temperatura.

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

Dichos filtros se acondicionaron al menos 24 horas en una desecadora bajo las siguientes condiciones: temperatura 15-30°C y humedad menor al 40%, antes de ser pesados en balanza analítica, al inicio y después de la conclusión de los muestreos.

1.1.3. Situación durante el año 2010:

Al comparar los promedios anuales obtenidos para los sitios de monitoreo de partículas PM₁₀ durante el año 2010, 34 y 52 µg/m³, para BE-01 y BE-02 respectivamente, se puede determinar que no se cumple la norma anual reportada en el decreto 30221-SALUD de 50 µg/m³ para el sitio BE-02. Sin embargo, tal como se puede apreciar en la figura 1, en ninguno de los dos sitios se incumple la norma de 24 horas (150 µg/m³), establecida en el mismo decreto.

En el caso de la estación de monitoreo BE-02, los valores más altos de concentración de partículas PM₁₀ se obtienen para los meses del año comprendidos en la época seca disminuyendo considerablemente durante el período de junio a noviembre, tal como se puede apreciar en la figura 2.

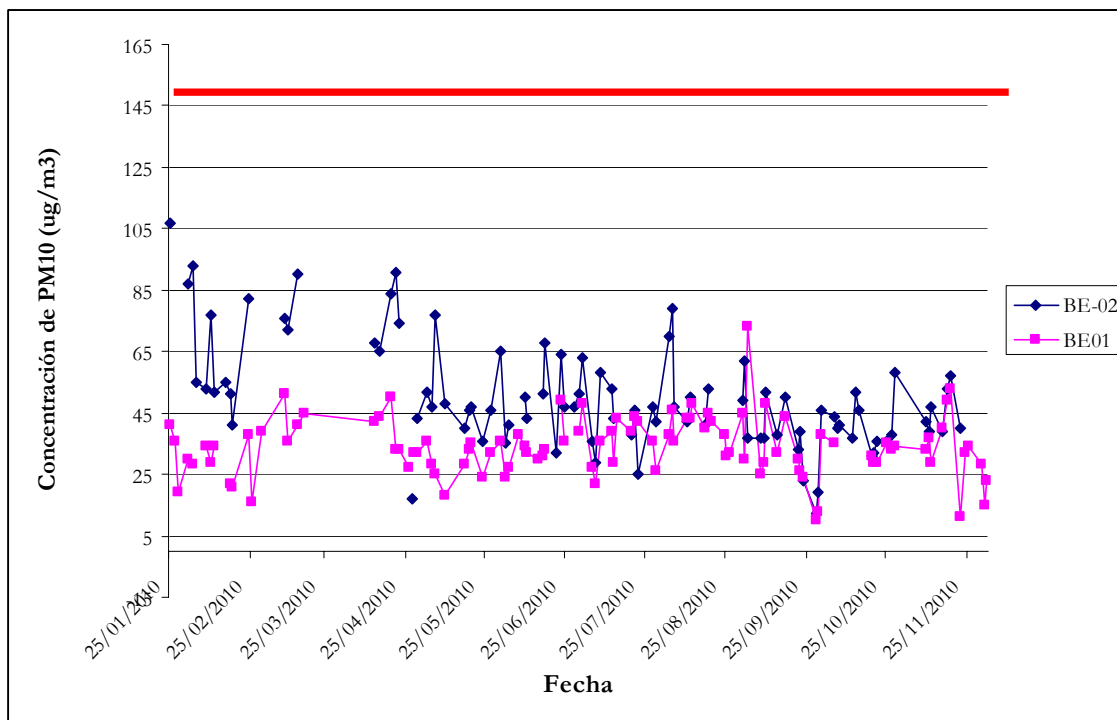


Figura 1. Concentraciones diarias de PM₁₀ obtenidas para las dos estaciones de monitoreo ubicadas en el Cantón de Belén durante el año 2010.

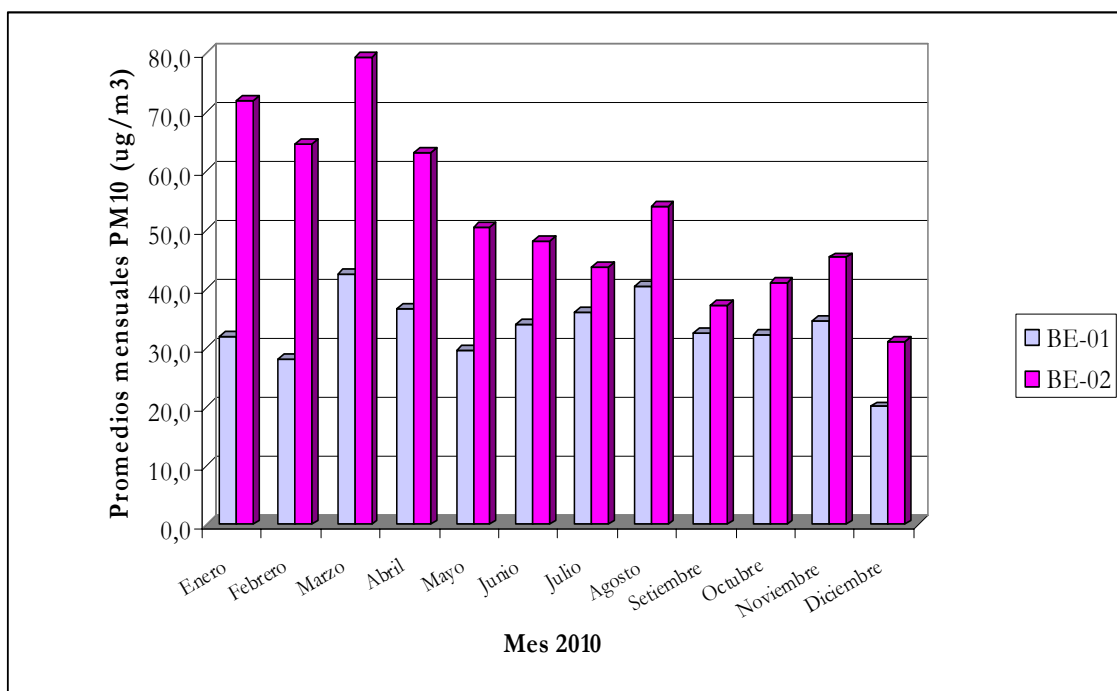


Figura 2. Variación de los promedios mensuales de PM₁₀ obtenidas para las dos estaciones de monitoreo ubicadas en el Cantón de Belén, año 2010.

Al comparar los promedios anuales de concentración de partículas PM_{10} , registrados en los dos sitios de monitoreo ubicados en el cantón de Belén, con los reportados para otras estaciones del Área Metropolitana de Costa Rica durante el mismo período de muestreo (Tabla 2), se puede observar que BE-02 y Heredia son los dos únicos sitios de la GAM, donde no se cumple la norma establecida en el decreto 30221-S. En forma adicional el sitio BE-01, presenta un promedio que no es significativamente diferente (5% de significancia) a los registrados en otros sitios con fuerte actividad comercial del Cantón Central de San José.

Tabla 2. Promedios anuales de partículas PM_{10} obtenidos en los sitios de monitoreo ubicados en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2010.

Sitio	BE-01	BE-02	Heredia	Hatillo, San José	La Uruca, San José	Escazú	Santo Domingo	Moravia	Alajuela
Promedio Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	34 (10)	52 (18)	52 (24)	35 (17)	37 (9)	24 (10)	24 (12)	21 (7)	25 (7)

El valor expresado entre paréntesis corresponde a la desviación estándar de los datos
Valores en rojo no cumplen el valor máximo anual permitido por el decreto 30221-S para partículas PM_{10}

En forma adicional, en el sitio BE-02 se incluyó a partir del año 2010 un muestreador de aire de alto volumen para partículas $PM_{2.5}$. Al igual que en el caso de las PM_{10} , existe evidencia importante sobre la asociación entre el aumento en la morbi-mortalidad y el crecimiento en la concentración de $PM_{2.5}$. Para este contaminante no se ha identificado un umbral por debajo del cual no se presenten daños a la salud, esto ha motivado que los límites para la protección de la salud pública sean cada vez más bajos. Las concentraciones límite propuestas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) son considerablemente más bajas que las vigentes en países latinoamericanos como México, tanto para el indicador de exposición aguda como el de exposición crónica. En la tabla 3, se presenta el valor promedio anual de concentración de partículas $PM_{2.5}$ obtenido para el sitio BE-02, el cual resulta ser el mayor registrado en las cuatro estaciones ubicadas en el Área

Metropolitana de Costa Rica. Cabe mencionar que la comparación se realiza con normativa internacional ya que el país no cuenta con norma para este contaminante dentro del decreto 30221-S. Los incumplimientos a la normativa de la OMS y la USEPA, en el caso del sitio BE-02, se dan tanto para el umbral de 24 horas como para el valor anual. Del total de días muestreados, el 52% presentan incumplimiento al valor límite reportado por la USEPA para muestreos de 24 horas.

Tabla 3. Promedios anuales de partículas PM_{2,5} obtenidos en los sitios de monitoreo ubicados en el Área Metropolitana de Costa Rica para el año 2010.

Sitio	BE-02	Heredia	Moravia	La Uruca, San José	Norma OMS	Norma USEPA	Norma México
Promedio Anual (µg/m ³)	36	35	13	27	24 horas:	24 horas:	24 horas:
Máximo (µg/m ³)	62	66	26	58	25 µg/m ³	35 µg/m ³	65 µg/m ³
Mínimo (µg/m ³)	14	9	6	14			
Desviación Estándar (µg/m ³)	11	21	5,6	8	Anual: 10 µg/m ³	Anual: 15 µg/m ³	Anual: 15 µg/m ³
Cociente PM _{2,5} /PM ₁₀	0,68	0,66	0,61	0,73			

Valores en rojo no cumplen el valor máximo anual permitido por la normativa internacional

La relación entre la concentración de partículas PM_{2,5} con respecto a las PM₁₀ corresponde a 0,68, esto indica que aproximadamente el 68% de las partículas PM₁₀ corresponden a partículas con diámetros aerodinámicos menores o iguales a 2,5 µm. Este valor es similar a 0,60 reportado por Dockery y Pope (1994) para centros urbanos en Norteamérica.

El promedio y desviación estándar de los principales constituyentes de las partículas PM₁₀ (iones inorgánicos y metales) analizados, para cada uno de los sitios de muestreo, se presentan en la tabla 4.

Para los sitios de muestreo, los iones predominantes resultaron ser el SO₄⁻² y el NO₃⁻, seguidos del Cl⁻ y PO₄⁻³. En el caso de los metales pesados, el Na, Al y Fe, mostraron las concentraciones mayores en las partículas PM₁₀, mientras que el Ni y el V fueron las especies menos abundantes.

Tabla 4. Concentración promedio de PM_{10} y sus principales constituyentes químicos obtenidos en los sitios de muestreo ubicados en el cantón de Belén, año 2010

Concentración ($\mu g m^{-3}$)	BELEN		
	BE-01 (N=148)	BE-02 (N= 142)	Promedio para el Cantón de Belén, 2010
PM_{10}	34 ± 10	52 ± 18	43
F ⁻	$0,06 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,03$	0,065
Cl ⁻	$0,98 \pm 0,58$	$1,01 \pm 0,62$	0,99
NO_3^-	$1,01 \pm 0,32$	$1,02 \pm 0,36$	1,02
PO_4^{3-}	$0,35 \pm 0,21$	$0,41 \pm 0,17$	0,38
SO_4^{2-}	$3,52 \pm 1,91$	$3,69 \pm 1,80$	3,60
NO_2^-	$0,18 \pm 0,07$	$0,21 \pm 0,05$	0,20
Metales ($ng m^{-3}$)			
V	$5,9 \pm 3,0$	$6,4 \pm 3,6$	6,2
Pb	$11,7 \pm 6,7$	$11,2 \pm 6,8$	11,5
Cr	$7,4 \pm 2,7$	$8,7 \pm 4,4$	8,0
Cu	140 ± 80	146 ± 65	143
Ni	$6,7 \pm 4,0$	$7,0 \pm 3,6$	6,8
Mn	121 ± 32	136 ± 24	128
Al	472 ± 126	673 ± 277	572
Fe	397 ± 166	553 ± 247	475
Ca	114 ± 73	367 ± 223	240
Mg	100 ± 41	154 ± 68	127
Na	1302 ± 580	1394 ± 376	1348
K	216 ± 112	231 ± 102	223

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

La relación de masa entre NO_3^-/SO_4^{2-} ha sido utilizada como un indicador de la importancia relativa de fuentes móviles versus fuentes estacionarias en el origen tanto del N como del S presente en la atmósfera (Arimoto et al., 1996; Yao et al., 2002). Arimoto et al. (1996) describen que un valor de la relación NO_3^-/SO_4^{2-} mayor a uno, evidencia la predominancia de las fuentes móviles sobre las estacionarias. Dichos autores, estiman que la relación de las emisiones de NO_x/SO_x , para motores de diesel es de 8:1, 13:1 para motores de gasolina y 1:3

para sistemas de combustión que operan con búnker. Si se considera que el contenido de azufre en el búnker, que se expende en Costa Rica (combustible utilizado en las calderas industriales), es de 1,0% es razonable utilizar el SO_4^{2-} como un indicador de emisiones de fuentes fijas y el NO_3^- para fuentes móviles. Para los sitios de muestreo se presentaron relaciones de $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$, presente en las partículas colectadas, comprendidas entre 0,28 y 0,34. Lo anterior se puede deber a la disminución de las emisiones de NO_x como producto del programa de revisión técnica vehicular del país así como al programa de mejoramiento de la calidad de los combustibles ejecutado por la Refinadora Costarricense de Petróleo. El patrón de vientos predominantes en el Área Metropolitana de Costa Rica favorece el transporte de masas de aire desde los océanos hasta la meseta central, debido a lo anterior es sumamente importante estimar el aporte del aerosol marino a la composición química de las partículas. Para ello, es necesario calcular la fracción de los distintos componentes inorgánicos influenciados por este. Especies como SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} tienen fuentes tanto marinas como continentales. Basado en la relación de masa de estos con respecto al Na^+ , el componente debido al aerosol marino se puede calcular mediante la siguiente ecuación (Duce et al., 1983):

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

donde la expresión $[X/Na]_{am}$ denota la relación de masa del ion X con respecto al Na^+ en el agua de mar, M_x y M_{Na} la concentración del ion X y del Na^+ en las partículas PM_{10} . De acuerdo con Berg y Winchester (1978), la relación de masa de las siguientes especies: SO_4^{2-} , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} 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 3 muestra la distribución, tanto de la fracción debida al aerosol marino como la atribuida a otras fuentes. Si se analiza el caso del SO_4^{2-} , se puede apreciar que aproximadamente el 93% de la concentración másica de este ion tiene un origen distinto al aerosol marino; en el caso del K^+ y el Ca^{2+} esta fracción representa como mínimo el 78% en los diferentes sitios de muestreo.

Sobre el continente, la fracción de SO_4^{2-} que no proviene del aerosol marino constituye un trazador de actividades antropogénicas y de quema de combustibles fósiles, el K_{nam} se origina mayoritariamente por quema de biomasa mientras que el Ca_{nam} tiene un origen predominantemente crustal.

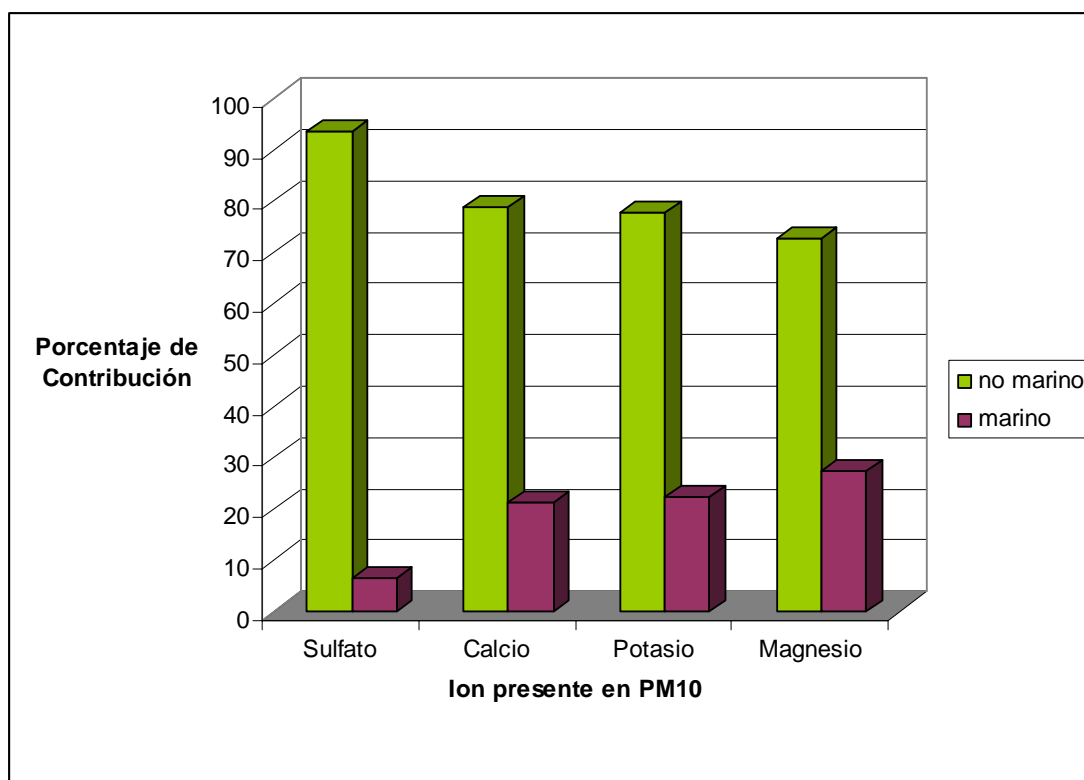


Figura 3. Contribución del aerosol marino a la composición química de las partículas colectadas en el cantón de Belén, 2010.

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

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

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

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

donde R es el elemento de referencia.

Los valores de factores de enriquecimiento calculados a partir de los datos de concentración de metales, presentes en las partículas colectadas en el cantón de Belén, se muestran en la tabla 5 y siguen la siguiente secuencia: Cu > Pb > Mn > Ni > Cr > V > Al .

Tabla 5. Factores de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas en los sitios de muestreo de partículas PM₁₀ ubicados en el cantón de Belén

Sitio de muestreo	V	Pb	Cr	Cu	Ni	Mn	Al
BE-01	4,7	52	8,1	160	11,6	23,4	0,3
BE-02	5,5	63	8,6	189	12,9	31,6	0,4

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

1.2. Dióxido de Nitrógeno:

1.2.1. Descripción:

Los óxidos de nitrógeno incluyen varias especies que contienen oxígeno y nitrógeno, sin embargo, desde el punto de vista de la salud humana el dióxido de nitrógeno es el más importante. El dióxido de nitrógeno es un fuerte oxidante y reacciona fácilmente con el agua para formar ácido nítrico y óxido nítrico. Este contaminante se produce durante la combustión pero en menores cantidades que el monóxido de nitrógeno (óxido nítrico), la mayor parte del dióxido de nitrógeno se genera por la oxidación del monóxido de nitrógeno en presencia de radicales orgánicos (Finlayson-Pitts y Pitts, 1986). En la tropósfera, este contaminante juega un papel importante en la producción fotoquímica del ozono y su presencia regula las concentraciones de ozono durante el día.

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

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

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

obstante, los estudios realizados sobre la capacidad de respuesta bronquial en los asmáticos parecen indicar que aumenta con niveles superiores a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ equivalente a 0.136 ppm (Organización Mundial de la Salud, 2006).

1.2.2. Metodología de muestreo:

Para el monitoreo de los niveles de NO_2 en el cantón de Belén, se seleccionaron un total de 11 puntos de muestreo distribuidos de acuerdo como se indica en la Tabla 6. Las muestras se colectan mensualmente desde el año 2007.

Tabla 6. Localización de los sitios de muestreo utilizados en el monitoreo de NO_2 en el Cantón de Belén.

Sitio	Tipo de punto	Ubicación Exacta
1	Comercial	Frente al Hotel Herradura
2	Residencial	Frente a la rotonda de acceso, Residencial Cariari
3	Comercial	Plaza de deportes de la Asunción
4	Industrial	Costado Norte de la Firestone
5	Residencial	Frente a la entrada principal del Hotel Marriot
6	Residencial	Frente a la iglesia de la Ribera
7	Comercial	Frente a la entrada del parque recreativo Ojo de Agua
8	Comercial	Frente al centro comercial Plaza Belén
9	Residencial	Frente al polideportivo de Belén
10	Comercial	Costado norte del Palacio Municipal
11	Industrial	Frente a la empresa Kimberly Clark

Las concentraciones de dióxido de nitrógeno se determinaron mediante muestreo pasivo, el cual se basa en los fenómenos de difusión y permeación, por los cuales las moléculas de un gas, que están en constante movimiento, son capaces de penetrar y difundirse espontáneamente a través de la masa de otro gas hasta repartirse uniformemente en su seno, así como de atravesar una membrana sólida que le presente una determinada capacidad de permeación.

El muestreo se realizó con colectores que contienen tubos con mallas de acero de 11 mm de diámetro (superficie de absorción) las cuales fueron previamente sumergidas en una disolución formada a partir de la mezcla de trietanolamina con acetona (relación 1:8) durante al menos 24 horas. Los contenedores de PVC (figura 4) se ubican en postes del tendido eléctrico a una altura no menor a los 3 m con respecto al nivel del suelo y se exponen en el sitio de muestreo por un plazo de 22 a 30 días para posteriormente ser trasladados al laboratorio para su análisis.



Figura 4. Esquema del colector pasivo para la determinación de dióxido de nitrógeno

1.2.3. Situación del año 2010:

En la tabla 7 se presentan el promedio anual y la desviación estándar de las concentraciones de NO₂ obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en el cantón de Belén durante el año 2010. Tal como se puede notar al menos tres sitios en Belén presentan valores mayores a 40 µg/m³, que corresponde a la norma anual establecida por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante.

Se utilizó el análisis de componentes principales para estudiar las variaciones espaciales de la concentración de dióxido de nitrógeno en los 11 sitios de muestreo ubicados en el cantón de Belén. Janssen et al (1989) han utilizado esta herramienta estadística, con anterioridad, para distinguir entre fenómenos locales y de larga escala en el análisis de contaminación del aire. El valor y signo de cada uno de los factores que conforman los componentes principales permite diferenciar si las

Tabla 7. Concentraciones promedio anuales de NO₂ (µg/m³) en los sitios de muestreo ubicados en el cantón de Belén, Costa Rica.

Sitio de Muestreo	Año 2010
1	35 (6)
2	19 (3)
3	44 (5)
4	33 (7)
5	30 (5)
6	19 (4)
7	29 (5)
8	47 (4)
9	22 (4)
10	42 (7)
11	28 (5)

El dato colocado entre paréntesis representa la desviación estándar del promedio

características de las fuentes de emisión locales afectan las concentraciones locales de cada uno de los sitios de monitoreo. Estos resultados pueden ser utilizados para validar la clasificación de los sitios de monitoreo. La tabla 8 resume los resultados del análisis estadístico para los datos promedio mensuales de dióxido de nitrógeno en el año 2010.

El porcentaje de la varianza total ($\text{Varianza} = \sum (X_{\text{modelo}} - X_{\text{medida}})^2$) explicado por el primer factor corresponde a un 46,7%, lo que implica que las concentraciones de NO₂ en los distintos sitios de monitoreo están fuertemente correlacionadas (cambios en fase). Lo anterior indica que las variaciones en la concentración de este gas están determinadas principalmente por fenómenos de larga escala (meteorológicos). El segundo componente correlaciona sitios de muestreo que se caracterizan por poseer

un alto índice de flujo vehicular, pudiendo esto sugerir que la principal fuente de emisión en este sector son las fuentes móviles.

Tabla 8. Resumen de los resultados del análisis de componentes principales utilizando los promedios mensuales de NO₂ registrados para los 11 sitios ubicados en el cantón de Belén, 2010.

Sitio de muestreo	Primer Componente	Segundo Componente
1	0,923	0,873
2	0,949	0,355
3	0,915	0,942
4	0,897	0,423
5	0,928	0,176
6	0,731	0,102
7	0,893	0,244
8	0,921	0,867
9	0,893	0,128
10	0,900	0,808
11	0,879	0,096
Porcentaje de la Varianza Total explicado	46,7	23,8

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

2.1. Descripción:

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

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

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

En ecosistemas terrestres y acuáticos, la lluvia ácida puede ocasionar la declinación de especies, no obstante, esto también depende del tiempo de exposición y del nivel de sensibilidad. En la vegetación puede causar daños directos como pérdidas de nutrientes foliares y necrosis en las hojas y tejidos reproductores, lo cual conduce al debilitamiento de la planta, pérdida de frutos y descenso de la productividad; sin embargo los efectos indirectos pueden ser mayores. La acidificación progresiva del suelo, origina la pérdida de cationes básicos y la acumulación de aluminio, inhibiendo la fijación de nitrógeno en leguminosas, la biodisponibilidad de fosfatos y el crecimiento de las raíces. Esto conduce a la defoliación, clorosis y debilitamiento generalizado de la planta, haciéndola

vulnerable al ataque de plagas, enfermedades, sequías u otros contaminantes. La degradación del suelo, también se manifiesta en aguas superficiales y mantos freáticos a través de procesos de acidificación, eutrofización y acumulación de metales tóxicos como el aluminio, que ocasionan la muerte progresiva de organismos acuáticos (USEPA, 2010).

2.2. Metodología de muestreo:

Se seleccionaron un total de 2 sitios de muestreo distribuidos en el cantón de Belén, los cuales se detallan en la tabla 9.

Tabla 9. Descripción de los sitios de muestreo para la colección de precipitación total en el cantón de Belén

Identificación del sitio de muestreo	Provincia	Cantón	Distrito	Descripción del sitio de muestreo
BE-01	Heredia	Belén	La Ribera	Centro Comercial La Ribera
BE-02	Heredia	Belén	La Asunción	Instalaciones de la Empresa Intermodal

En los sitios seleccionados, el muestreo de la depositación total se efectuó a través de un embudo de polietileno de 20 cm de diámetro, acoplado a una botella de polietileno de alta densidad de un litro mediante un orificio en la tapa, rellenando el espacio libre, entre el embudo y la tapa, con silicona caliente, para evitar la contaminación de la muestra (figura 5). El sistema de muestreo se encuentra sostenido por una base de metal de 1,25 m de altura, para prevenir la contaminación del sistema por salpicaduras. El colector utilizado cumple con las especificaciones recomendadas por Galloway et al. (1982) y permite captar la precipitación húmeda más algunos componentes introducidos al colector en forma seca.

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

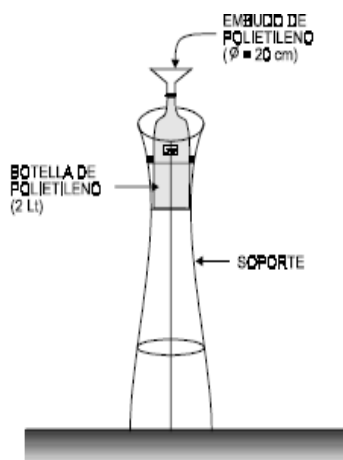


Figura 5. Diagrama del colector de precipitación total

La colección de las muestras durante la campaña de muestreo se efectuó en períodos de 24 horas, durante los meses de junio a noviembre del 2010. Los volúmenes colectados variaron desde 25 hasta 110 ml. El número total de muestras colectadas fue de 68.

Una vez colectadas las muestras fueron trasladadas al laboratorio, en donde, a la muestra se le determinó el volumen de agua colectado, pH, conductividad y la concentración de iones (SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , PO_4^{3-}).

2.3. Situación en el año 2010:

En la tabla 10 se presentan los valores medios y desviación estándar, ambos ponderados por volumen de la conductividad e iones inorgánicos evaluados en las muestras de precipitación total colectadas en los 2 sitios de muestreo. A la hora de aplicar la prueba estadística de Kruskal Wallis se encontró que no hay diferencia significativa en las concentraciones de iones obtenidas en los sitios de muestreo, a un nivel de significancia del 5%. Las concentraciones de las especies iónicas más importantes presentes en las muestras de precipitación total obedecen el siguiente orden: $\text{SO}_4^{2-} > \text{H}^+ > \text{NO}_3^-$. La concentración de Cl^- sugiere que se encuentra asociado directamente a una influencia marina. Con respecto al F^- , proviene de emisiones antropogénicas generadas principalmente por las industrias que llevan a

cabo procesos de combustión con carbón de acuerdo a lo reportado por Zunckel et al. (2003).

Los valores promedio ponderados por volumen de pH más ácidos, se registran en el sitio BE-02, el cual es un sitio con gran flujo vehicular y concentración de industrias. Para este sitio aproximadamente entre el 24% de los eventos presentan pH mayores a 5,6, que es el pH del agua de nube en equilibrio con el dióxido de carbono atmosférico (Charlson and Rodhe, 1982).

Tabla 10. Promedios ponderados por volumen para la concentración de iones inorgánicos ($\mu\text{eq/l}$) y conductividad encontrados en las muestras de precipitación total colectadas en dos sitios ubicados en el cantón de Belén, junio-noviembre, 2010.

Concentración ($\mu\text{equiv l}^{-1}$)	Sitios de muestreo	
	BE-01	BE-02
F ⁻	7,9 ± 4,6	7,1 ± 3,3
Cl ⁻	14 ± 16	16 ± 14
NO ₂ ⁻	5,1 ± 0,4	5,8 ± 1,6
NO ₃ ⁻	12,8 ± 9,8	16,5 ± 6,4
PO ₄ ³⁻	23 ± 11	25 ± 13
SO ₄ ²⁻	48 ± 25	62 ± 28
H ⁺	37 ± 18	32 ± 19
Conductividad (μScm^{-1})	17 ± 9	24 ± 10

La acidez de la precipitación total es controlada principalmente por los ácidos fuertes, como por ejemplo H_2SO_4 y HNO_3 . Considerando que los iones SO_4^{2-} y NO_3^- son los principales componentes de acidificación de la precipitación, se puede estimar la Acidez Fraccional (AF) calculada como (Balasubramanian et al., 2001):

$$\text{AF} = \frac{[\text{H}^+]}{([\text{nsm SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-])}$$

Si esta relación es uno, se considera que la acidez generada por los ácidos fuertes no es neutralizada totalmente. La figura 6 muestra la variación de la acidez fraccional obtenida en las muestras de precipitación de cada uno de los sitios de muestreo. Es importante hacer notar que para aquellos sitios ubicados en el cantón de Belén, aproximadamente solo el 30-60 % de la acidez es neutralizada por constituyentes alcalinos. En forma adicional, se puede observar que para el año 2010 la fracción neutralizada resulto ser mucho menor para ambos sitios.

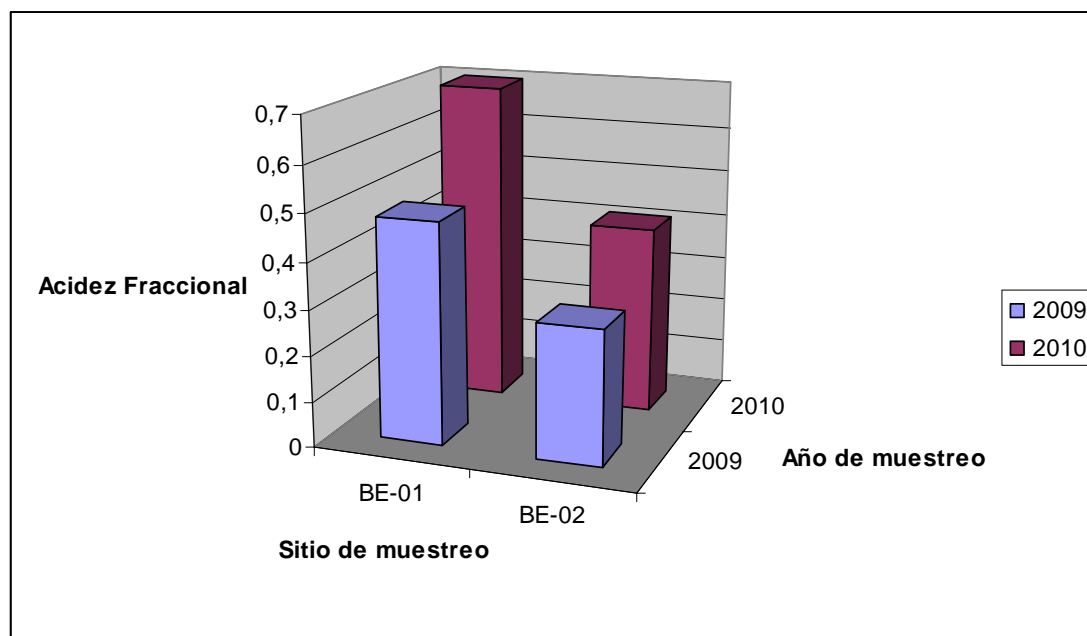


Figura 6. Variación de la acidez fraccional en las muestras de precipitación total colectada en los sitios de muestreo ubicados en el cantón de Belén, 2009 y 2010.

3. Análisis de Tendencias en la calidad del aire del cantón de Belén

3.1. Partículas PM₁₀:

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

Al analizar la tendencia registrada por los datos de partículas PM₁₀ para el sitio de monitoreo BE-01 en los últimos cuatro años (2007-2010) se puede observar que se presenta una tendencia al descenso en este sitio con una tasa anual cercana al 5% (figura 7).

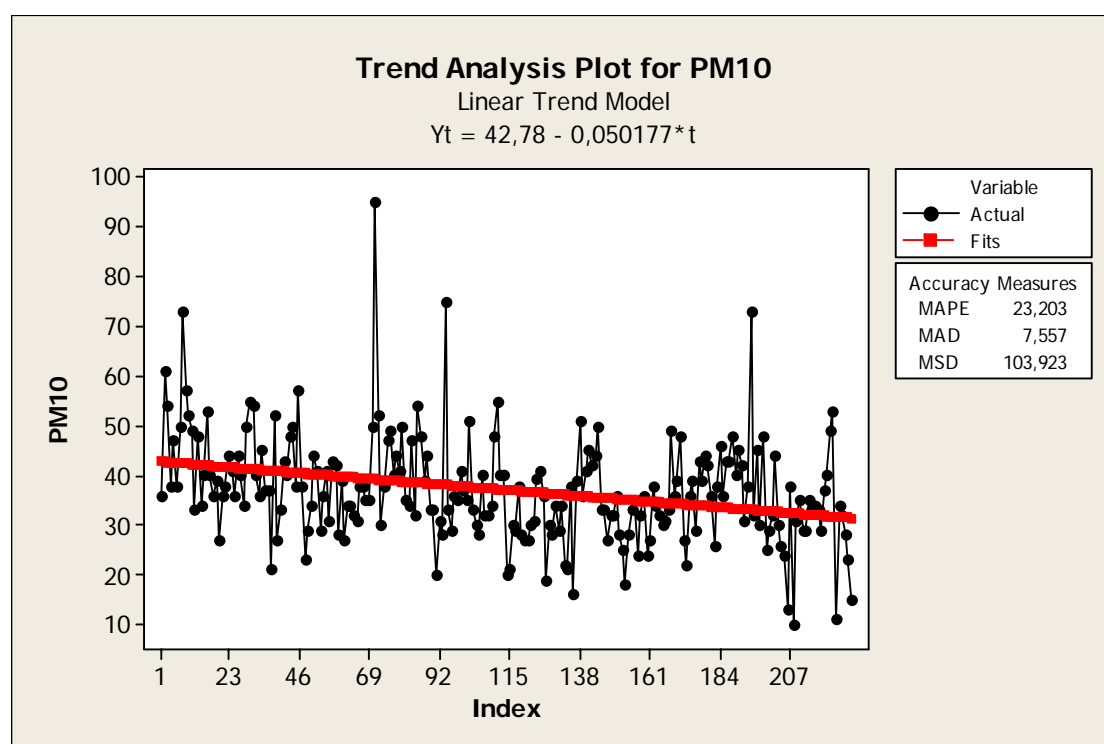


Figura 7. Tendencia de los valores de PM₁₀ para el sitio de monitoreo BE-01, años 2007-2010.

Este descenso puede ser atribuido a los esfuerzos realizados por el Ministerio de Ambiente y Energía y la Refinadora Costarricense de Petróleo por mejorar el contenido de azufre en los combustibles, especialmente el caso del diesel, en donde se pasó de 3500 a tan sólo 100 ppm, coincidentemente en el mismo período de tiempo. Sin embargo de acuerdo con datos generados en el último inventario de emisiones de contaminantes criterio del Área Metropolitana de Costa Rica, el 97% de las emisiones de dióxido de azufre provienen de fuentes fijas, por lo que no se espera una reducción adicional en las emisiones de este contaminante hasta tanto no se mejore la calidad del búnker utilizado en los procesos de combustión industriales. Es importante mencionar que existen importantes correlaciones entre el contenido de azufre de los combustibles y las emisiones de material particulado, especialmente en procesos de combustión.

Sin embargo, tal como se muestra en la tabla 11, el descenso en el contenido de azufre del combustible, no ha tenido una repercusión directa en el contenido de sulfato de las partículas, cuyo valor ha tendido a mantenerse constante en el período 2007-2010. Lo anterior se puede deber al hecho de que las principales fuentes emisoras responsables de la generación de sulfato en partículas pudieran ser las emisiones de fuentes fijas, principalmente las originadas en procesos de combustión.

Tabla 11. Promedio anuales de los principales constituyentes químicos de las muestras de partículas PM₁₀, colectadas en el sitio BE-01 de 2007-2010.

Contaminante	2007	2008	2009	2010
SO ₄ ²⁻ en PM ₁₀	3,3 ± 0,9	3,0 ± 0,9	3,2 ± 1,3	3,5 ± 1,9
NO ₃ ⁻ en PM ₁₀	0,29 ± 0,17	0,52 ± 0,24	0,85 ± 0,22	1,01 ± 0,32

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

3.2. Dióxido de Nitrógeno:

En la tabla 12 se presentan el promedio anual y la desviación estándar de las concentraciones de NO₂ obtenidas para cada uno de los sitios de muestreo localizados en el cantón de Belén. Tal como se puede notar al menos tres sitios en Belén presentan valores mayores a 40 µg/m³, que corresponde a la norma anual establecida por la Organización Mundial de la Salud para este contaminante. Es importante hacer notar, que el número de sitios con incumplimientos al norma de la OMS, ha venido creciendo en los últimos tres años.

Tabla 12. Concentraciones promedio anuales de NO₂ (µg/m³) en los sitios de muestreo ubicados en el cantón de Belén, Costa Rica.

Sitio de Muestreo	Año 2008	Año 2009	Año 2010
1	34 (5)	32 (9)	35 (6)
2	16 (4)	18 (5)	19 (3)
3	37 (7)	41 (6)	44 (5)
4	35 (9)	26 (3)	33 (7)
5	25 (6)	25 (8)	30 (5)
6	17 (4)	17 (6)	19 (4)
7	27 (5)	26 (5)	29 (5)
8	40 (8)	41 (5)	47 (4)
9	17 (10)	18 (7)	22 (4)
10	30 (5)	36 (9)	42 (7)
11	24 (3)	25 (7)	28 (5)

El dato colocado entre paréntesis representa la desviación estándar del promedio

Si se agrupan los datos mensuales de concentración de NO₂ de acuerdo a la naturaleza del sitio de muestreo (actividad local) para el caso de Belén, tal y como se muestra en la figura 8, se puede observar que las tres categorías (comercial, industrial

y residencial) presentan un comportamiento muy similar. Además es claro que los sectores comerciales e industriales presentan valores muy cercanos de concentración de dióxido de nitrógeno, con datos muy cercanos o por encima del límite establecido por la Organización Mundial de la Salud.

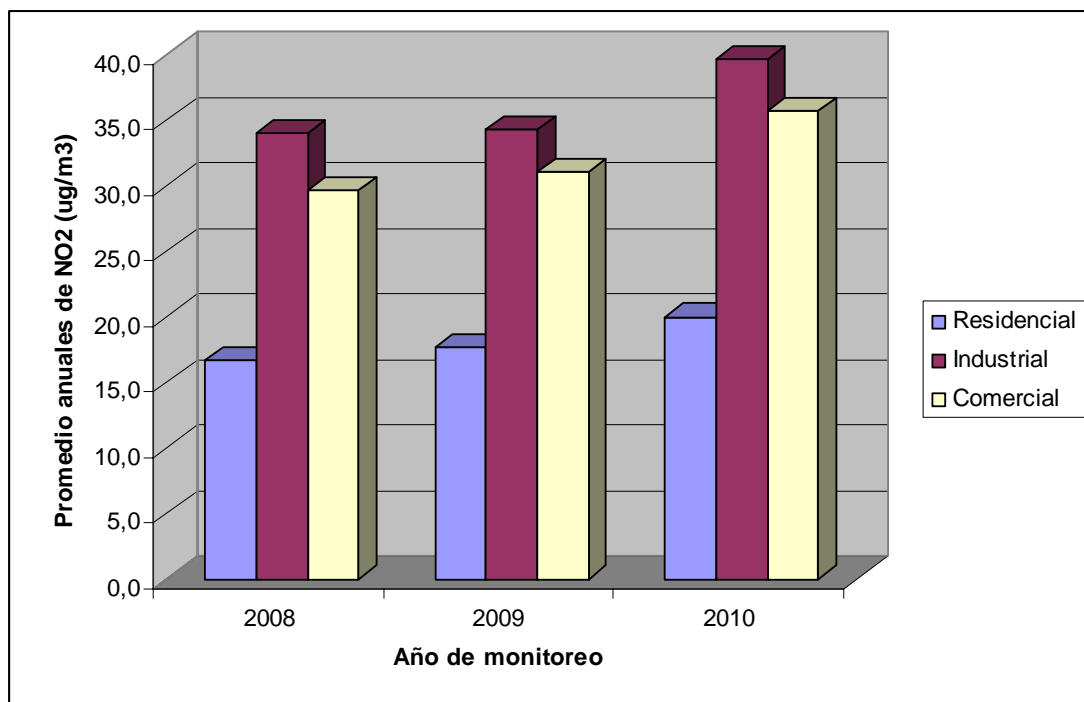


Figura 8. Comparación de niveles de NO₂ registrados en cantón de Belén para el período 2008-2010, por tipo de sitio de muestreo.

Los valores elevados registrados en los sitios comerciales pueden ser atribuidos al alto flujo vehicular que se presentan en dichas zonas. Por otro lado el sector residencial se diferencia bastante de los otros sectores presentando valores significativamente menores. Posteriormente se hizo un análisis de promedios móviles para analizar la tendencia histórica que tienen los datos. A partir de este análisis se determinó que los tres sectores presentan una tendencia al alza en las concentraciones de dióxido de nitrógeno, solo que la tasa de crecimiento resulta ser

22 y 17% anual para el sector industrial y comercial y de tan sólo un 11% para el sector residencial.

4. Conclusiones

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

1. Específicamente el sitio de monitoreo BE-02, junto con el ubicado en la Rectoría de la Universidad Nacional en Heredia son los dos únicos puntos de medición de PM_{10} de las 15 estaciones existentes en el Área Metropolitana de Costa Rica, en donde el promedio anual supera el límite de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido en el decreto 30221-S, durante el año 2010. Dicho sitio se encuentra ubicado en una zona de alto flujo vehicular con una fuerte concentración de actividades industriales.
2. En forma adicional, dicho sitio de monitoreo presenta concentraciones anuales de partículas $PM_{2,5}$ superiores a las establecidas en las regulaciones de la OMS y la USEPA. Tanto esta situación como la descrita en el apartado 1, requieren del establecimiento de un plan de gestión de calidad del aire. Dicho plan debe partir de un inventario cantonal de emisiones, que señale cuales son las áreas prioritarias de intervención para controlar los niveles de material particulado.
3. Si bien es cierto la concentración de partículas PM_{10} en el sitio BE-01 presenta una tendencia a la baja, con una tasa cercana al 5% anual (2007-2010), provocada, probablemente, por los esfuerzos realizados por RECOPE por reducir el contenido de azufre en los combustibles, las características de este sitio son muy diferentes a BE-02. BE-01 se encuentra ubicada en una zona de transición entre el área comercial y residencial del cantón, en donde es de esperarse un fuerte predominio de las emisiones generadas por fuentes móviles mientras que en BE-02 se presentan un aporte adicional importante de fuentes fijas que utilizan combustibles que no forman parte del programa de mejora de RECOPE.
4. La tendencia en la concentración de dióxido de nitrógeno presenta datos no muy alentadores, ya que los niveles en sitios de monitoreo residenciales, comerciales e industriales crecen anualmente a tasas entre 22 y 11%, provocado por el incremento en la flota vehicular, que según datos del

Primer Inventario de Emisiones de la GAM 2007, son las principales fuentes emisoras que contribuyen a las inmisiones de este contaminante. A partir de estos resultados es importante trabajar en un análisis profundo de los patrones de movilidad existentes en el cantón, con el fin de aumentar la velocidad promedio de circulación de vehículos en Belén y desfavorecer el uso de vehículos individuales sobre los colectivos.

5. Como parte del impacto de la contaminación del aire a los ecosistemas, se registran en el cantón de Belén un 24% de eventos de precipitación con valores de pH por debajo de 5,60 (lluvia ácida). Esta situación podría estar causando impactos de la calidad de los suelos del cantón y en las plantas y árboles presentes en los distintos ecosistemas predominantes en el cantón, adicionado al daño en estructuras metálicas. Es importante señalar que durante el año 2009 se presentaron solamente un 15% de eventos de precipitación con características de lluvia ácida.
6. Se debe fortalecer el monitoreo de la calidad del aire en el cantón, ya que el actual diseño no incluye todos los contaminantes criterio contenidos en el decreto 30221-S, cuyas emisiones son importantes de acuerdo con el último inventario de emisiones del Área Metropolitana de Costa Rica, 2007.
7. Los contaminantes monitoreados presentan en algunos casos concentraciones anuales mayores a las establecidas como valores límites para exposición crónica en la normativa nacional, lo que evidencia la urgente necesidad de establecer políticas de gestión tanto a nivel regional como local, con el fin de proteger la salud de los habitantes del cantón de Belén.

5. Referencias Bibliográficas

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

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

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

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

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

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

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

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

Janssen, L.H.J.M., Visser, H., Rokmer, F.G., 1989. Analysis of large-scale sulphate, nitrate, chloride and ammonium concentrations in the Netherlands using an aerosol measuring network. *Atmospheric Environment* 23, 2783-2796.

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

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

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

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

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

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

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