

Resultados del Monitoreo Atmosférico en la Ciudad de Cochabamba

Dennis Bascopé Moscoso

Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería

Universidad Católica Boliviana

Cochabamba, Bolivia

e-mail: bascop@ucbcba.edu.bo

Introducción

Aunque la problemática de la contaminación del aire es tan antigua como el descubrimiento del fuego, es desde la revolución industrial que sus efectos se hacen sentir sobre las poblaciones de las urbes industrializadas del llamado primer mundo. Sin embargo, en la actualidad, la contaminación atmosférica es también un problema en numerosas ciudades de nuestra región y no solamente en aquellas que cuentan con grandes instalaciones industriales. En efecto, según estudios del Banco Mundial, la mayor parte de la contaminación atmosférica en América Latina proviene de los vehículos automotores [4].

En la ciudad de Cochabamba, al igual que en los demás centros urbanos de nuestro país, diversos factores económicos y sociales han producido un rápido crecimiento poblacional durante las dos últimas décadas. Este incremento de la población se ha acompañado de un crecimiento prácticamente exponencial del parque automotor, sobre todo durante los pasados diez años. Los vehículos registrados en Cochabamba ya habían superado el número de 120.000 en el año 2000 [5]. Una consecuencia de estos hechos ha sido el deterioro de la calidad del aire de nuestra ciudad, el cual, desde hace varios años atrás, es claramente percibido por la población.

Con el fin de tomar medidas para la mitigación de la contaminación del aire, nace la iniciativa de implementación de una Red de Monitoreo de la Calidad del Aire en la ciudad de Cochabamba, que constituye una primera y muy importante etapa. En un esfuerzo conjunto, la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico (SwissContact), la H. Alcaldía Municipal de Cochabamba y la Universidad Católica Boliviana San Pablo dan inicio en el mes de julio del año 2001 a las primeras mediciones de la contaminación del aire en el Municipio del Cercado de Cochabamba.

El objetivo principal de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire es el de determinar los niveles de contaminación atmosférica a los que se halla expuesta la población de

nuestra ciudad. Esto permitirá evaluar el riesgo sobre la salud humana que representan las concentraciones de contaminantes atmosféricos y así se podrán establecer medidas reguladoras para mitigar las emisiones actuales.

El presente documento pretende resumir los resultados de las actividades de monitoreo que hasta ahora ha efectuado la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cochabamba, llamada Red MoniCA.

Criterios de calidad del aire

Contaminantes criterio

Hasta la fecha, el número de contaminantes de la atmósfera conocidos supera la centena [3]. No obstante, no todos pueden ser objeto de estudios y mediciones. Es así que un número reducido de ellos, por ser más abundantes y al mismo tiempo nocivos para la salud, es objeto de constantes investigaciones y también reglamentaciones. Los componentes de este grupo de contaminantes, llamado de contaminantes criterio, son someramente descritos a continuación:

El monóxido de carbono (CO) es un gas producido por la combustión incompleta de combustibles fósiles. La quema de leña, carbón y aun los cigarrillos emiten monóxido de carbono al ambiente. Este gas afecta principalmente el transporte de oxígeno en la sangre.

El dióxido de azufre (SO₂) proviene de la quema de combustibles que contienen azufre, principalmente la fracción más pesada de los hidrocarburos y la biomasa. La fundiciones de minerales pueden también emitir grandes cantidades de dióxido de azufre a la atmósfera. La ingestión de este gas puede producir en el ser humano irritaciones de las mucosas del aparato respiratorio y reducción de la función pulmonar.

El dióxido de nitrógeno (NO₂) es producido principalmente por la quema de combustibles fósiles a altas temperaturas. Los motores de combustión interna de los vehículos lo producen en grandes cantidades. En el ser humano, sus efectos pueden ser: irritación de las mucosas del aparato respiratorio, reducción de la función pulmonar y sensibilización a infecciones respiratorias.

El ozono (O₃) se produce en la troposfera por la reacción del dióxido de nitrógeno con compuestos orgánicos volátiles en la presencia de luz solar. Al no ser un contaminante emitido directamente de una fuente, se lo clasifica entre los contaminantes secundarios. Puede provocar en el hombre irritación de las mucosas del aparato respiratorio y reducción de la función pulmonar.

Las partículas en suspensión están constituidas por polvo, cenizas, humo de tabaco en el ambiente, condensación de vapores así como otros derivados de las emisiones de hidrocarburos, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. En el hombre sus efectos son de tipo exacerbación de patologías pulmonares y cardíacas crónicas [1].

Aunque la Red MoniCA monitorea los cinco contaminantes arriba mencionados, en el presente documento se hará alusión sólo a los primeros cuatro. Esto se debe a que el

tiempo en que se monitorea el material particulado es todavía muy corto.

Normas de calidad del aire

Cuando se realiza el monitoreo de la calidad del aire, el primer instrumento de interpretación de los resultados son los estándares o normas de calidad del aire. Estas normas "fijan valores máximos permisibles de concentración de contaminantes"[3] considerándose que al ser sobrepasados la salud humana se ve afectada. El objetivo principal de las normas de calidad del aire es el de proteger la salud de la población, principalmente los grupos más sensibles. Se establecen a partir de diversos tipos de estudios que pueden ser epidemiológicos, toxicológicos, etc.

La legislación boliviana establece en el Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica, de la Ley de Medio Ambiente, Límites Permisibles de Calidad del Aire para los contaminantes criterio. Existen también otros estándares que son internacionalmente reconocidos como los Valores Guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) o los Estándares de Calidad del Aire de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos de Norteamérica.

Metodología del monitoreo

Sitios de muestreo

El emplazamiento de las estaciones de muestreo se ha realizado tomando en cuenta diversos factores técnicos, de manera que la toma de muestras sea representativa de la zona en que se localiza cada estación. Se ha considerado el tipo de actividad de la zona, el tráfico vehicular, la densidad poblacional, la topografía y también la accesibilidad, la seguridad y la disponibilidad de energía eléctrica. Se han definido 16 sitios de muestreo que pueden ser divididos en tres tipologías:

- *Centro urbano*, donde existe un alto flujo vehicular de velocidad baja.
- *Periferie*, donde el flujo vehicular es aún elevado aunque rápido.
- *Residencial*, donde el flujo vehicular es bajo y lento.

Métodos de muestreo

Actualmente existen innumerables metodologías para el monitoreo de la calidad del aire. La adopción de una u otra depende tanto de los objetivos del monitoreo como de la disponibilidad de recursos humanos, tecnológicos y económicos. La Red MoniCA, para el monitoreo de gases, utiliza actualmente muestreadores pasivos y analizadores automáticos.

Muestreadores pasivos

Los muestreadores pasivos, dado su costo de inversión reducido y simplicidad en la operación, son utilizados en la totalidad de los sitios de muestreo de la Red MoniCA. Con tubos pasivos se monitorean dos contaminantes criterio: dióxido de nitrógeno y ozono. En el cuadro 1 se presentan algunos detalles de las metodologías empleadas [6].

Contaminante	Metodología	Sustancia reactiva	Método de análisis	Intervalo de muestreo
NO ₂	Palmes et al.	Trietanolamina	Espectrofotometría	2 semanas
O ₃	Monn & Hangartner	1,2-di-(4-piridil) etileno (DPE)	Espectrofotometría	2 semanas

Cuadro 1: Metodologías de muestreo pasivo utilizadas por la Red MoniCA.

Analizadores automáticos

Aunque los analizadores automáticos son extremadamente costosos y constituyen un nivel de tecnología altamente avanzado y de difícil aplicación en nuestro medio, son, hoy en día, el medio más confiable y preciso para el monitoreo atmosférico. En el presente documento se comentarán las mediciones efectuadas con los siguientes equipos:

Contaminante	Principio de análisis del equipo	Intervalo de muestreo	Modelo del equipo
SO ₂	Fluorescencia UV	15 minutos	API 100A
NO _x	Quimiluminiscencia	15 minutos	API 200A
O ₃	Absorción UV	15 minutos	API 400A
CO	Absorción IR	15 minutos	API 300

Cuadro 2: Analizadores automáticos cuyas mediciones son discutidas en el presente documento.

Resultados del monitoreo

Los resultados presentados a continuación abarcan dos periodos de muestreo: de junio a noviembre del año 2001 y de junio a septiembre del 2002. El vacío de información entre estos dos periodos se debe a problemas técnicos, consecuencia de sobrecargas en la red pública de electricidad.

Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Para el monitoreo de dióxido de nitrógeno se cuenta actualmente con ocho sitios de muestreo; todos ellos cuentan a su vez con muestreadores pasivos y sólo dos de ellos con analizadores automáticos.

Monitoreo pasivo

Una desventaja de los muestreadores pasivos constituye su relativa baja precisión, el error que se puede esperar es de al menos 10 % [6]. Es así que los valores de concentración obtenidos son principalmente útiles para la comparación entre diferentes sitios de muestreo. No obstante, su bajo costo de operación permite instalar un número importante de sitios de muestreo.



Figura 1: Distribución de concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2). Promedios de enero a septiembre de 2002. Unidades: $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Gracias a la amplia cobertura que permiten los muestreadores pasivos, se ha podido estimar una distribución de los niveles de contaminación por dióxido de nitrógeno en una gran parte de la ciudad. La figura de la derecha (Fig. 1) muestra la mencionada distribución con la ayuda de curvas de nivel que son meramente ilustrativas.

Las mayores concentraciones de NO_2 , como se podía esperar, se han observado en el centro de la ciudad. Al mismo tiempo, una clara disminución de las mismas se observa hacia la periferie. Esta disminución que es muy marcada hacia el Norte y hacia el Sur, lo es menos en las direcciones Oeste y Este. Una explicación de este hecho parece ser la presencia de las carreteras inter-departamentales que salen de la ciudad, precisamente, en esas direcciones.

Según los valores de concentración obtenidos, un área importante del centro de la ciudad se halla por encima del valor guía de la OMS ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) para periodos de muestreo de un año. Los niveles de contaminación por dióxido de nitrógeno representan un peligro para la población que permanece durante periodos de tiempo prolongados en las calles del centro.

Monitoreo automático

Los muestreadores pasivos nos sirven también para poder ubicar los lugares más críticos en cuanto a la contaminación. Es en estos sitios donde se hace más interesante instalar los analizadores automáticos, los cuales proveen mayor detalle sobre la evolución de las concentraciones y con elevada precisión. La estación de monitoreo ubicada en la Plaza Colón, equipada con un analizador automático de NO_2 , constituye entonces una fuente de información sobre los niveles más elevados que se pueden encontrar en la ciudad.

La evolución temporal de las concentraciones de NO_2 observada en la Plaza Colón refleja claramente su relación con el nutrido flujo vehicular que transita la zona (Fig. 2). Las menores concentraciones se perciben solamente a altas horas de la noche y hasta la madrugada. Poco después de las 7 de la mañana las concentraciones sufren un gran incremento que solo disminuye para el medio día y se eleva otra vez al final de la tarde para llegar a sus máximos niveles entrada la noche.

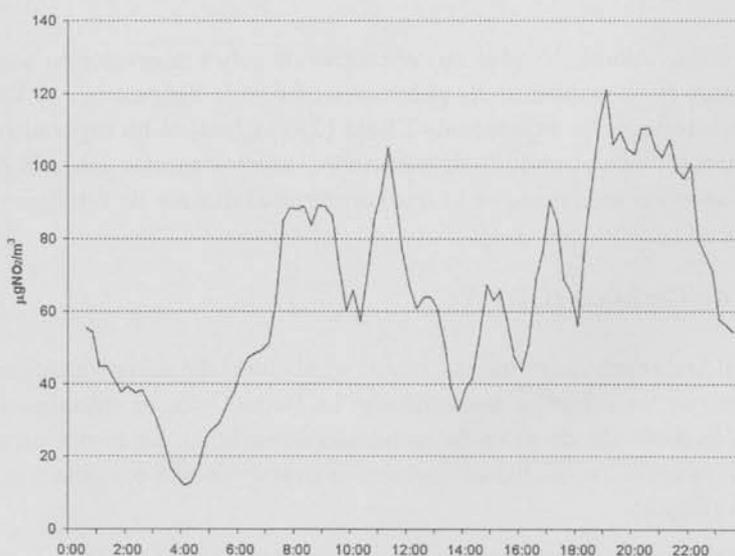


Figura 2: Variación temporal del NO_2 en la estación de la Plaza Colón durante el día miércoles 3 de julio de 2002.

Los promedios diarios de concentración de NO_2 medidos en la estación de muestreo

de la Plaza Colón superan de manera prácticamente permanente los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Valor Guía, para periodos de muestreo de un año, de la OMS) (Fig. 3), lo cual confirma los resultados obtenidos con los tubos pasivos y el riesgo de exposición crónica de la población.

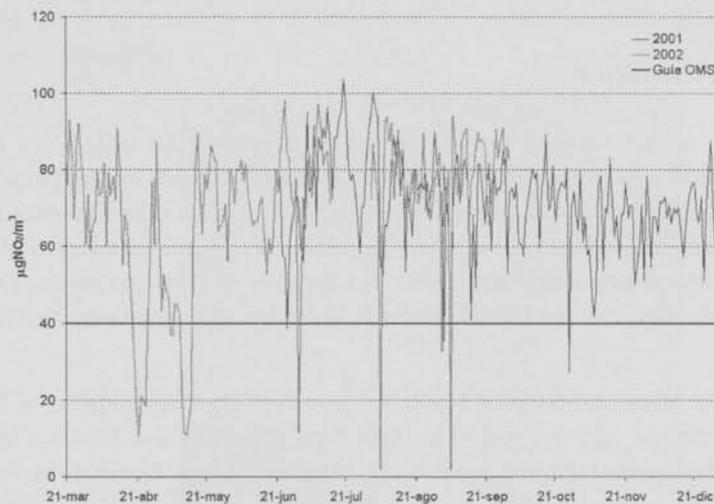


Figura 3: Medias diarias de concentración de NO_2 en la estación de la Plaza Colón.

Por otro lado, valores elevados de concentración sobre intervalos cortos no parecen presentarse muy frecuentemente. Se puede observar en la figura 4 que el Valor Guía de la OMS para intervalos de muestreo de 1 hora ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) se ha superado en contadas ocasiones durante todo el periodo de monitoreo. Efectos agudos sobre la población se hacen entonces poco probables, en lo que concierne al dióxido de nitrógeno.

Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono es un gas, que al igual que el dióxido de nitrógeno, proviene principalmente de los vehículos automotores. La Plaza Colón es entonces un sitio interesante para la medición de picos de monóxido de carbono. La evolución temporal de las concentraciones de monóxido de carbono es prácticamente paralela a la del dióxido de nitrógeno (Fig. 5).

En cuanto al nivel de contaminación por monóxido de carbono, las concentraciones observadas han superado en varias ocasiones el Límite Permissible de Calidad del Aire boliviano establecido para intervalos de muestreo de ocho horas (Fig. 6). Estas superaciones, sin embargo, no ocurren de manera permanente; alrededor de 17 días en todo el periodo de muestreo. Aunque, de un modo general, no se puede hablar de elevados riesgos por exposición al monóxido de carbono, la situación actual no deja de ser preocupante, sobre todo si se piensa en la población mas sensible.

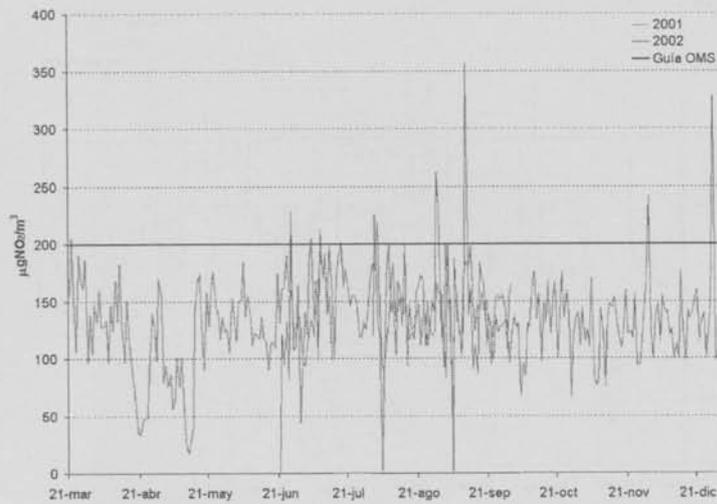


Figura 4: Promedios de 1 hora máximos de NO₂ observados en la estación de la Plaza Colón. Las concentraciones se comparan con el Valor Guía de la OMS (200 µg/m³).

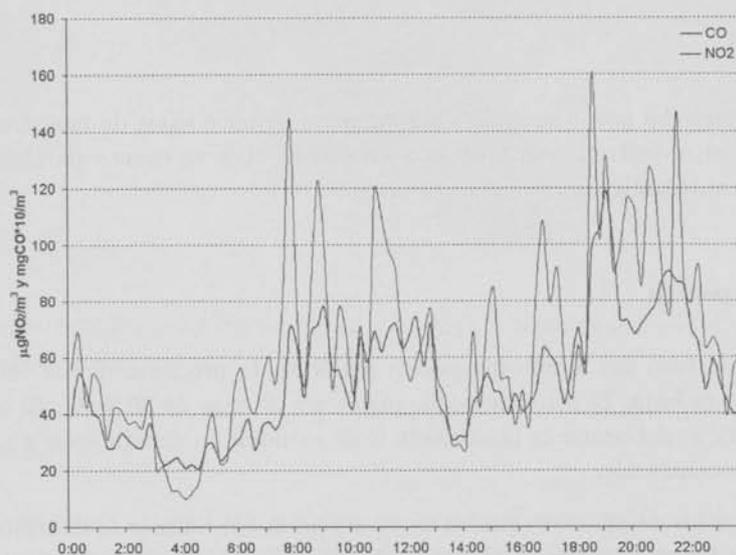


Figura 5: Variación temporal del CO en la estación de la Plaza Colón durante el día miércoles 3 de julio de 2002 mostrada en paralelo al NO₂.

Se han efectuado comparaciones entre las concentraciones de CO obtenidas con otras normas de calidad del aire; sin embargo, aparte de la mencionada más arriba no se ha excedido ninguna.

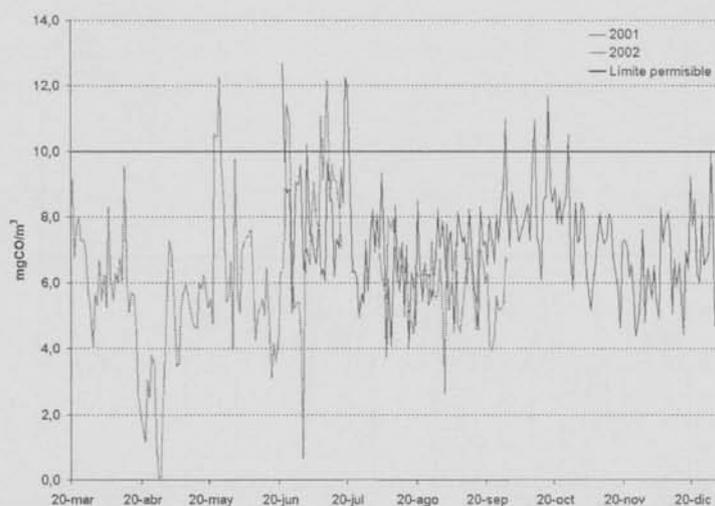


Figura 6: Promedios de 8 horas máximos de CO observados en la estación de la Plaza Colón. Las concentraciones se comparan con el Límite Permisible de Calidad del Aire de la Legislación Ambiental Boliviana 10 mg/m^3 .

Ozono (O_3)

El monitoreo del ozono se realiza actualmente en once sitios de muestreo; en todos ellos se utilizan muestreadores pasivos y en dos de ellos se cuenta paralelamente con analizadores automáticos.

Monitoreo pasivo

Como es el caso del monitoreo pasivo del NO_2 , la precisión de los tubos pasivos para el ozono es baja. El error probable puede ser de más de 20% [6]. El objetivo del monitoreo pasivo del ozono es igualmente el de estudiar su distribución y no tanto los valores de concentración.

Los once sitios de muestreo pasivo de ozono permiten estimar la distribución representada en la figura 7, a través de curvas de nivel. Se puede observar que las mayores concentraciones de ozono se encuentran en las afueras de la ciudad. A la inversa del NO_2 , las concentraciones aumentan hacia el Norte y hacia el Sur. No obstante, el sector de mayor exposición parece ser la zona norte de la ciudad.

Para el ozono, no se han establecido normas de calidad del aire para periodos de muestreo prolongados. Para estimar la magnitud del riesgo sobre la salud humana es necesario referirse a la información de los analizadores automáticos que provee información sobre intervalos más cortos y así poder referirse a las normas de calidad existentes para intervalos de una hora o de ocho horas.



Figura 7: Distribución de concentraciones de ozono (O₃). Promedios de enero a septiembre de 2002. Unidades: $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Monitoreo automático

La estación de muestreo del Parque Tunari se halla en el extremo norte de la ciudad, la cual cuenta con un analizador automático. Se presume entonces que los valores de concentración que ahí se han medido son los más altos de toda la ciudad.

Por ser el ozono un contaminante secundario, su evolución a lo largo del día es, en cierta medida, menos sensible al tráfico vehicular y también retardada en relación al mismo. En efecto, los mayores valores de concentración se observan, en el Parque Tunari, en horas de la tarde (Fig. 8). Es necesaria toda la mañana para que las emisiones del centro de la ciudad reaccionen con la luz solar y lleguen hasta la zona norte transformadas en ozono.

Aunque las concentraciones de ozono no son directamente determinadas por las emi-



Figura 8: Variación temporal del O₃ en la estación del Parque Tunari durante el día miércoles 3 de julio de 2002.

siones vehiculares, existe una clara dependencia entre éstas. En la estación de SEMAPA (Av. Circunvalación) se cuenta con mediciones simultáneas de ozono y de óxidos de nitrógeno, las cuales nos muestran la relación entre las emisiones del tráfico vehicular y el ozono.

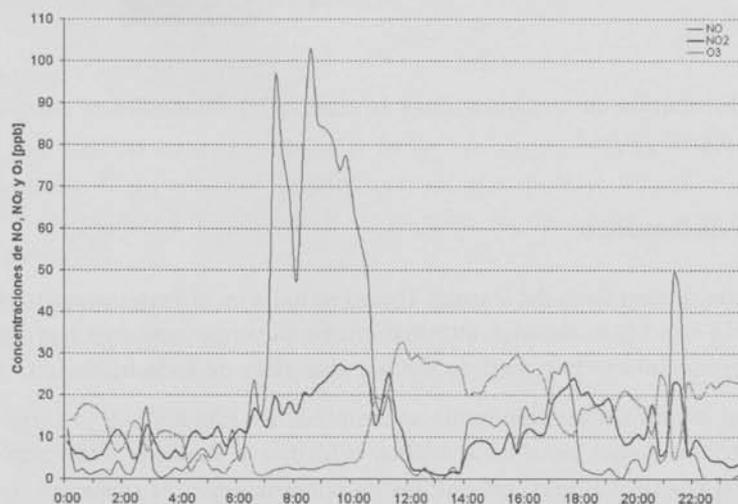


Figura 9: Variación temporal simultánea de NO, NO₂ y O₃ en la estación de SEMAPA durante el día miércoles 10 de julio de 2002.

La figura 9 nos permite analizar el ciclo de los óxidos de nitrógeno y del ozono a lo largo de un día. Los motores de los vehículos emiten principalmente monóxido de nitrógeno (NO) el cual es oxidado en la atmósfera en dióxido de nitrógeno (NO₂) [2]. Sus concentraciones son más altas en las horas de mayor flujo vehicular. En la zona de la estación de SEMAPA esto sucede en la mañana y al final de la tarde, como se observa en la figura. Sólo en la tarde, cuando los óxidos de nitrógeno han sido expuestos durante un cierto tiempo a la luz solar, los niveles de ozono comienzan a subir y se mantienen estables para reducirse en la noche y bajar a casi cero en la madrugada.

Sin embargo, para analizar los picos de concentración de ozono en la ciudad, es necesario estudiar las mediciones del extremo norte de la ciudad (Parque Turnari). El valor guía de la OMS para promedios de 8 horas (120 µg/m³) ha sido excedido en la mencionada estación solamente en tres ocasiones durante todo el periodo de muestreo (Fig. 10). Difícilmente se puede sugerir que existan grandes riesgos sobre la población debidos a la exposición al ozono.

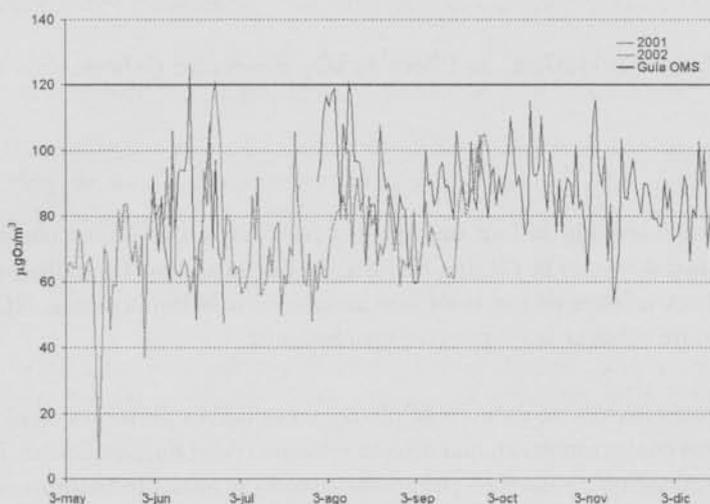


Figura 10: Promedios de 8 horas máximos de O₃ observados en la estación situada a nivel del ingreso al Parque Turnari.

Dióxido de azufre (SO₂)

Dos sitios de muestreo de dióxido de azufre se han instalado con analizadores automáticos: en la Av. Circunvalación, en los predios de SEMAPA, y en la zona de Jaihuayco. Las dos estaciones han arrojado valores de concentración de SO₂ extremadamente bajos en relación a cualquier norma de calidad del aire existente. En la figura 11 se comparan las concentraciones obtenidas con el estándar de calidad del aire de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos), dicho estándar no es ni siquiera aproximado.

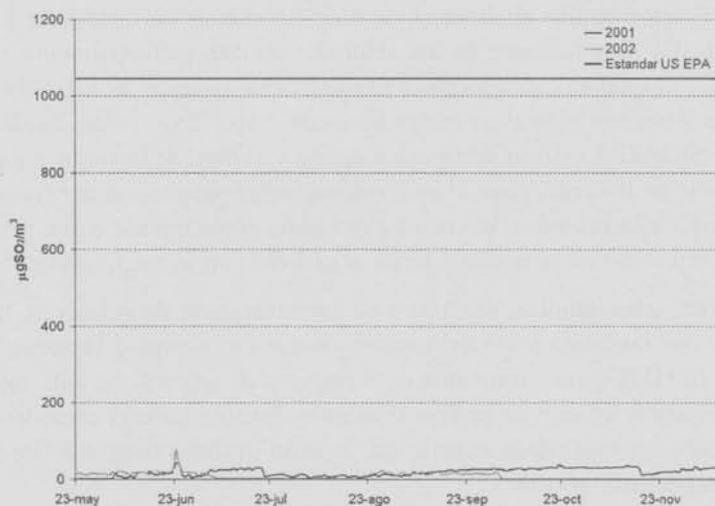


Figura 11: Promedios máximos de 1 hora de SO_2 observados en la estación de SEMAPA.

Conclusiones

En el presente trabajo se han descrito los resultados más importantes que se han obtenido del monitoreo de la calidad del aire en Cochabamba. El análisis de las mediciones de concentraciones de los gases contaminantes más importantes, NO_2 , CO , SO_2 y O_3 , nos permite esbozar las siguientes conclusiones:

- Los mayores niveles de dióxido de nitrógeno se hallan presentes en el centro de la ciudad, los cuales muestran una directa relación con el flujo vehicular. Estos niveles de contaminación no parecen peligrosos cuando se analizan tiempos de exposición breves, de una hora. Sin embargo, tomando en cuenta las concentraciones promedio diarias a lo largo de todo el periodo de muestreo, se puede decir que existen serios riesgos para la población que se halla expuesta de manera prolongada.
- En cuanto al monóxido de carbono, se han detectado numerosos picos que superan el Límite Permisible de Calidad del Aire de la Ley de Medio Ambiente Boliviana. Aunque estos picos no tienen lugar de manera permanente, alrededor de 17 días en un año, constituyen una importante señal de alerta.
- Las concentraciones de ozono en el extremo norte de la ciudad, la más expuesta, no alcanzan por el momento niveles preocupantes. Sin embargo, se han dado 3 episodios, durante el periodo de muestreo, en que se ha superado el Valor Guía de la OMS para intervalos de muestreo de 8 horas.
- En cuanto al dióxido de azufre, las concentraciones medidas muestran que, de un modo general, no representa un peligro.

Agradecimientos

El presente trabajo fue posible gracias al esfuerzo del equipo técnico y científico de la Red MoniCA, el cual está integrado por: Edgar Bilbao, Christian Bomblat, Marcos Luján e Indira Vargas, además del autor. Mi gratitud a todos ellos.

Del mismo modo, es necesario subrayar y agradecer el imprescindible apoyo del Honorable Alcaldía Municipal y la Fundación Suiza de Cooperación para el Desarrollo Técnico (SwissContact).

Referencias

- [1] M. Korc. *Curso de orientación para el control de la contaminación del aire*. OPS/CEPIS, Lima, 1999.
- [2] E. Manahan. *Environmental Chemistry*. Ed. Lewis, Florida, 1994.
- [3] A.P. Martinez y I. Romieu. *Introducción al monitoreo atmosférico*. Organización Panamericana de la Salud, México, D.F., 1997.
- [4] B. Onursal y S. Gautum. *Contaminación atmosférica causada por vehículos: experiencias de siete centros urbanos latinoamericanos*. Reporte técnico, Banco Mundial; Washington D.C., 1997.
- [5] Organismo Operativo de Tránsito. Registro de vehículos automotores. Cochabamba, 2000.
- [6] UNEP/WHO. *Methodology Reviews, Vol. 4: Passive and Active Sampling Methodologies for Measurement of Air Quality*. WHO/EOS/94.4, UNEP/GEMS/94.A.5, UNEP: Nairobi, 1994.