

Evaluación espacial y temporal de la contaminación por SO₂, NO₂, O₃ y CO en la ciudad de Córdoba.

Ana C. Mateos¹, Ana C. Amarillo¹, Iván Tavera Busso¹ y Claudia M. González¹

¹Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: 25/08/2017

Fecha de aceptación del manuscrito: 28/09/2018

Fecha de publicación: 28/09/2018

Resumen— Los contaminantes criterio (perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos) son seis: material particulado, plomo y cuatro compuestos en fase gaseosa: CO, O₃, SO₂ y NO₂. Se eligieron 10 sitios de monitoreo dentro de la ciudad de Córdoba (Argentina) que representaron distintos usos del suelo: Residencial (2 sitios), Industrial (3 sitios), Agrícola (1 sitio) y sitios cercanos a calles con alto tránsito vehicular (4 sitios). Se determinaron las concentraciones (ppb) de inmisión cada 15 minutos de los contaminantes gaseosos durante 18 meses. Se analizaron patrones de variación horaria, espacial y estacional, además del cumplimiento de los límites permitidos. Las zonas industriales y residenciales presentaron la mayor concentración de SO₂ y las zonas con alto tránsito vehicular las mayores concentraciones de NO₂ y CO. Las concentraciones de O₃ fueron variables según la estación, observándose en verano las mayores concentraciones en las zonas agrícolas. Además, en el centro de la ciudad se superaron los límites permitidos para NO₂ todo el año, con valores similares a los observados en grandes urbes altamente contaminadas del mundo, poniendo estos resultados en manifiesto la necesidad de tomar medidas para disminuir la concentración de estos contaminantes en la ciudad.

Palabras clave— Gases contaminantes criterio; Monitoreo de la calidad del aire; ciudad de Córdoba.

Abstract— Criterion pollutants (detrimental to human health and well-being) are six: particulate matter (PM), lead and four components in gas phase: CO, O₃, SO₂ and NO₂. Ten monitoring sites were selected within the city of Córdoba (Argentina) representing different land uses: Residential (2 sites), Industrial (3 sites), Agricultural (1 site) and sites near streets with high vehicular traffic (4 sites). Concentrations (ppb) were determined every 15 minutes of the gaseous pollutants for 18 months. Patterns of hourly, spatial and seasonal variation were analyzed, in addition to compliance of the permitted limits. Industrial and residential areas had the highest concentrations of SO₂ and areas with high vehicular traffic the highest concentrations of NO₂ and CO. The concentrations of O₃ were variable according to the season, observing in summer the highest concentrations in the agricultural zones. In addition, in the city center, the limits allowed for NO₂ throughout the year were exceeded, with values similar to those observed in large, heavily polluted cities of the world. Measures to reduce the concentration of these pollutants in the city are needed urgently.

Keywords— Criteria gases pollutants; Air quality monitoring; Córdoba city.

INTRODUCCIÓN

Los contaminantes del aire se clasifican como contaminantes criterio (CC) y contaminantes no criterio. Los contaminantes criterio se han identificado como perjudiciales para la salud y/o el medio ambiente y el bienestar de los seres humanos (Clarke et al., 2014). Se los denomina contaminantes criterio, porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población (USEPA, 1970). Los denominados CC son el material particulado (PM), el plomo y cuatro compuestos en fase gaseosa: SO₂, NO₂, O₃ y CO. El SO₂ y NO₂ son gases que contribuyen a la

deposición ácida en ecosistemas terrestres ya sea como deposición seca o deposición húmeda disueltos en las nubes, lluvia y niebla. El NO₂ es de especial importancia ya que es precursor de oxidantes fotoquímicos que impactan directamente en la salud humana, como el O₃ troposférico, principal componente del smog fotoquímico (Cox, 2003). Gran parte de la emisión de monóxido de carbono (CO) tiene su origen en el empleo de la gasolina como combustible de los vehículos a motor, especialmente en áreas urbanas (Olcese y Toselli, 1997; Téllez et al., 2006; Pires et al., 2008).

En los países desarrollados, las industrias y las agencias gubernamentales monitorean de forma rutinaria y en tiempo real, los contaminantes emitidos por unidad de tiempo (emisión) y la concentración en el aire de éstos (inmisión) y estos datos suelen estar a disposición de la población. Por otra parte, los organismos de control comprueban esta información para verificar el cumplimiento de las leyes ambientales (Singh et al., 2013). En muchos países en vías de desarrollo, la situación es

Dirección de contacto:

Ana Carolina Mateos, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 29771, ac.mateos@unc.edu.ar

diferente, no solo por la falta de datos sino también por la accesibilidad a los mismos. Así, a pesar de la progresiva degradación de la calidad del aire como consecuencia del rápido desarrollo de las ciudades, solo algunas industrias controlan sus emisiones con regularidad, pero estos datos no están disponibles al público, siendo a veces difícil de obtener incluso para las agencias gubernamentales (Abril *et al.*, 2014). Esta situación se ve agravada por el hecho de que las agencias ambientales suelen estar mal equipadas con sensores que carecen de un mantenimiento adecuado o no disponen de los equipos necesarios para llevar a cabo este tipo de monitoreo (Carreras y Pignata, 2001; Olcese y Toselli, 2002).

La ciudad de Córdoba presenta problemas de polución atmosférica, particularmente en invierno debido a los fenómenos de inversión térmica (Olcese *et al.*, 2001). Por primera vez, en el año 1995, se colocaron dos estaciones para monitorear la calidad del aire en la ciudad de Córdoba, en el marco de un programa gubernamental denominado Sistema de Monitoreo Ambiental (SiMA) (Carreras y Pignata, 2001); sin embargo este finalizó en el año 2001. Estos contaminantes gaseosos fueron medidos sistemáticamente por última vez en el período 1995-1996 en la ciudad de Córdoba por un grupo de investigación mediante el empleo de dos estaciones ubicadas en sitios urbanos (Olcese y Toselli, 2002). En la actualidad la ciudad de Córdoba, no cuenta con mediciones de contaminantes por parte de ningún organismo gubernamental.

La ciudad de Córdoba ha experimentado un gran crecimiento en los últimos años, desarrollándose actividades industriales, nuevas prácticas agrícolas, proyectos inmobiliarios y un importante aumento del parque automotor, lo que plantea la necesidad de monitorear la calidad del aire; al menos, evaluar la concentración en el aire de los contaminantes señalados como criterio que son los que afectan a la salud de la población.

Los objetivos de este trabajo fueron determinar las concentraciones de inmisión de SO₂, NO₂, CO y O₃, mediante el empleo analizadores automáticos en la ciudad de Córdoba y alrededores para determinar si existen zonas con distinta calidad de aire relacionadas a los distintos usos del suelo presentes en la ciudad (variación espacial). Además, analizar la variación estacional y horaria de las concentraciones de los cuatro gases con el fin de poder brindar información que podría ser empleada como alerta temprana sobre cuáles son los horarios más apropiados para realizar actividades al aire libre.

METODOLOGÍA

Se seleccionaron 10 sitios representativos de los distintos usos del suelo presentes en la ciudad según la principal actividad económica desarrollada en el lugar (agrícola, sitios control o residenciales, industrial y zonas de alto tránsito). Luego se clasificó de manera más detallada los sitios a monitorear según tipo de industria, localización geográfica en la ciudad y tipo de tránsito vehicular. Así los sitios fueron denominados de la siguiente forma: Planta

Cementera [PC] (1 sitio), Control Norte [CN] (1 sitio), Control Sur [CS] (1 sitio), Tránsito Céntrico [TC] (2 sitios), Industria metalúrgica [IM] (1 sitio), Industria metal-mecánica [IMM] (1 sitio), Tránsito en Avenidas [TA] (2 sitios) y Agrícola [A] (1 sitio) (Fig. 1).

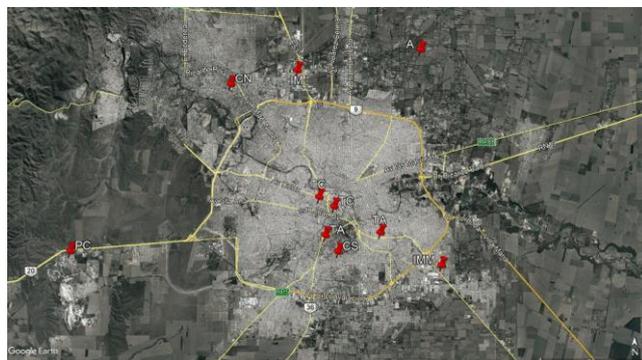


Fig. 1. Sitios de monitoreo de contaminantes gaseosos en la ciudad de Córdoba, Argentina.

Se colocaron dos analizadores automáticos simultáneamente en los sitios de monitoreo durante 14 a 21 días a 3 m del suelo. Los sensores electroquímicos se colocaron dentro de una caja de acero resistente a la intemperie (Fig. 2), la que además contenía una batería que brindaba energía a los sensores con una autonomía de muestreo de 21 días. Se midieron las concentraciones de inmisión en tiempo real cada 15 minutos de NO₂, SO₂, O₃ y CO. Se realizaron mediciones en las 4 estaciones del año en todos los sitios de monitoreo. Se calibró la medición de los sensores con gases estándar cada 6 meses para evaluar el correcto funcionamiento de los analizadores (Mateos y González, 2016).



Fig. 2. Sensores electroquímicos de medición de contaminantes gaseosos Cairpol® y cabezal de protección con batería.

Se calcularon medias, desvíos estándar, mínimos y máximos para cada gas monitoreado; se realizaron Análisis de la Varianza (ANOVA) donde el nivel de significancia se estableció como $\alpha = 0,05$; cuando el valor de p fue menor ($p < 0,05$) se realizó el Test a posteriori LSD (*Least Significant Difference*) de Fisher. Por otro lado se realizaron Análisis multivariado (Análisis de Componentes Principales) para detectar la asociación entre los distintos usos del suelo con los contaminantes gaseosos. El número de componentes principales (CP) se determinó de modo que tuvieran un autovalor mayor a 1 (criterio de Kaiser) y que explicaran más del 75 % de la varianza (Pires *et al.*, 2008). Las concentraciones de los gases estudiados fueron mapeadas utilizando el software Surfer® 11.

Dirección de contacto:

Ana Carolina Mateos, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 29771, ac.mateos@unc.edu.ar

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las últimas mediciones sistemáticas de contaminantes gaseosos en la ciudad de Córdoba fueron realizadas en el año 2001, lo que destaca la importancia de los datos colectados en este trabajo. La legislación nacional (Ley N° 20.284) fue sancionada en el año 1973 y no cuenta con ninguna revisión posterior de los límites establecidos (Tabla 1). Es por esto que aquí para evaluar si se superan las concentraciones de inmisión permitidas de contaminantes en el aire se utilizaron los valores establecidos por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (USEPA) que establece la Ley de Aire Limpio (*Clean Air Act*), donde se constituyen Normas Nacionales de Calidad del Aire (*National Ambient Air Quality Standards – NAAQS*) para contaminantes considerados perjudiciales para la salud pública y el medio ambiente (Tabla 1). Estos valores se encuentran en permanente revisión y son más estrictos que los enunciados en la Ley Nacional.

Tabla 1. Valores límites primarios establecidos por la Legislación Nacional (Ley N° 20.284) y por la USEPA (NAAQS).

Contaminante	Ley Nacional	USEPA-NAAQS
CO (media móvil 8 h)	10 ppm	9 ppm
NO ₂ (media 1 h)	0,45 ppm	0,10 ppm
O ₃	0,10 ppm (media 1 h)	0,07 ppm (media móvil 8 h)
SO ₂ (media 1 h)	1 ppm	0,075 ppm

Se realizaron gráficos de líneas considerando las medias de 1 h para SO₂ y NO₂ y las medias móviles de 8 h para O₃ y CO, a fin de detectar si se superaban los límites máximos permitidos de concentración. A modo de referencia en las Fig. 3 a Fig. 5 se observan las concentraciones medias obtenidas en los sitios de tránsito céntrico, donde cada línea representa un día de monitoreo en el sitio. No se muestran gráficos para las concentraciones de O₃ ya que en los sitios de TC las concentraciones registradas siempre estuvieron por debajo del límite de detección de los sensores.

En ningún uso del suelo y en ninguna estación del año, se superó el valor del límite primario establecido para CO (9000 ppb). El valor máximo observado fue de 1800 ppb (1,8 ppm) en el área de TC (Fig. 3). El límite establecido para O₃ tampoco fue superado en ningún sitio a lo largo del año. Los límites de la legislación Argentina plantean que no debe superarse una concentración de O₃ de 100 ppb (media 1 h); la USEPA plantea un estándar primario de 70 ppb (media 8 h). Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) presenta un límite más exigente que estos últimos, de 50 ppb (media 8 h). Teniendo en cuenta este límite, en ambas zonas residenciales o consideradas Control (CS y CN) se incumplió el mismo en la estación estival. Las concentraciones presentes en las zonas industriales, tanto IMM como las IM se acercaron a este límite (48 ppb y 40 ppb

respectivamente), pero no lo superaron. Los límites primarios para SO₂ (75 ppb) fueron superados en los sitios de industrias metalúrgicas (IM) y metal-mecánicas (IMM). Además, se observaron picos aislados de SO₂ en el sitio CN (verano) y A (otoño). En cercanías a los sitios que representan la zona de control norte, se encuentran pequeños basurales donde se realiza quema de residuos y también es común la quema de vegetación (poda), ambos fenómenos que aportan compuestos azufrados al aire. En los sitios correspondientes a TC no se superaron los límites para este gas (Fig. 4). Por último, el límite primario para NO₂ (100 ppb) fue superado en la mayoría de las zonas monitoreadas: en los sitios de TC (Fig. 5) y TA en todos los períodos estacionales; en CN en primavera; en CS e IMM en invierno. Estos resultados afirman que la mayor fuente de contaminación en el microcentro y avenidas es el tránsito vehicular. Particularmente, para las industrias metal-mecánicas, éstas se encuentran en el predio Industrial Ferreyra ubicado sobre una avenida que presenta un gran flujo de vehículos particulares, camiones, camionetas, etc., por lo que además de los contaminantes provenientes de las industrias, también sufren aporte de polutantes provenientes del tránsito vehicular.

Comparando las concentraciones presentes en la ciudad de Córdoba con la de otras grandes áreas urbanas densamente pobladas (< 0,5 millón de habitantes), los valores de concentración de CO medidos en Córdoba (2388 hab./km²) fueron considerablemente menores que los reportados por Tiwari et al. (2015) para Nueva Delhi (174 hab./km²) (India) y por Yoo et al. (2014) para el área sur de Corea del Sur. Respecto a la concentración de SO₂, Córdoba presentó concentraciones similares a las reportadas para Shanghai (3688 hab./km²) (Xie et al., 2015) y Turquía (105 hab./km²) (Civan et al., 2015) encontrándose en el rango de 8-20 ppb. La concentración media de NO₂ en Córdoba fue semejante a las observadas para Shanghai (Xie et al., 2015), para la ciudad de Xi'an (575 hab./km²) en China (Zhang et al., 2015) y para el sur de China (Hu et al., 2016). Por último, los valores de O₃ reportados tanto en Xi'an (Zhang et al., 2015) como en Brasil para Salvador (4171 hab./km²) y Curitiba (4250 hab./km²) (Campos et al., 2010) son similares a los obtenidos para la ciudad de Córdoba, siendo en el resto de las ciudades considerablemente más altos. Considerando la concentración de SO₂ y NO₂ medidos en la ciudad de Córdoba, se destaca la similitud con grandes ciudades de China, donde el problema de la contaminación atmosférica ha sido reportado como un asunto de extrema prioridad (Chen et al., 2009). A pesar de que este país oriental enfrenta altas concentraciones de diversos contaminantes lo que genera una problemática ambiental mucho más severa que en Córdoba, los valores medidos constituyen una señal de alarma para la ciudad de Córdoba y plantean la urgente necesidad de implementar medidas de control.

Considerando los valores netos de concentración de los gases para toda la ciudad, éstos se ordenaron de la siguiente manera: CO > NO₂ > O₃ > SO₂. La Fig. 6 a Fig. 9 muestran mapas con curvas de isoconcentración de los distintos gases en cada sitio evaluado clasificado según el uso del suelo, valores obtenidos en invierno, debido a que es la estación que presenta la menor calidad ambiental en todo el año. Estos mapas permiten observar

simultáneamente los rangos de las concentraciones de contaminantes en cada sitio de monitoreo.

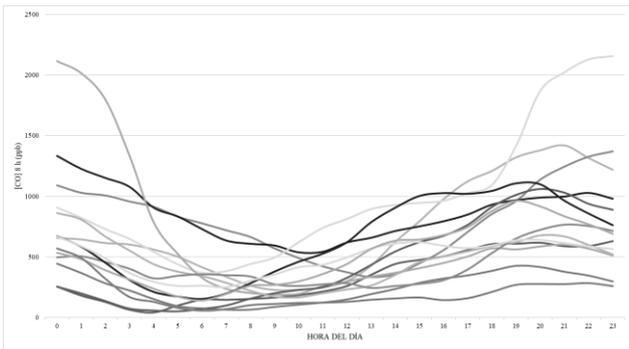


Fig. 3. Concentraciones medias móviles (8 h) para CO durante el período de muestreo en el área de Tránsito céntrico (TC) en la ciudad de Córdoba. Límite establecido en el NAAQS: 9000 ppb.

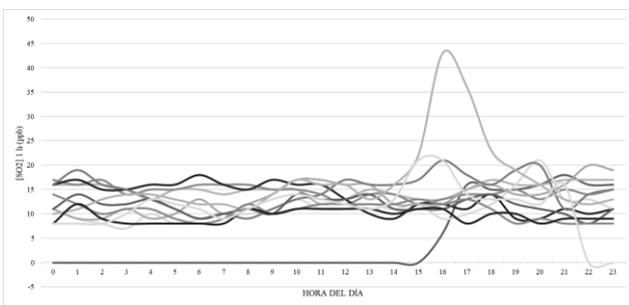


Fig. 4. Concentraciones medias horarias de SO₂ durante el período de muestreo en el área de Tránsito céntrico (TC) en la ciudad de Córdoba. Límite establecido en el NAAQS: 75 ppb.

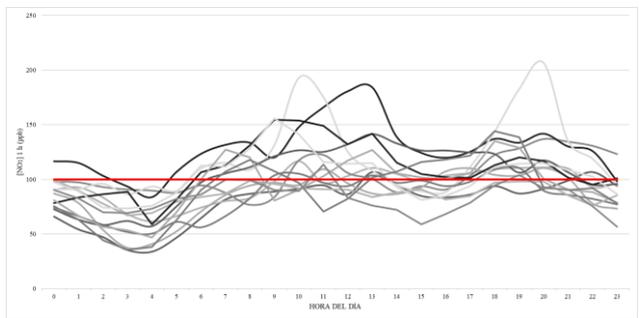


Fig. 5. Concentraciones medias horarias de NO₂ durante el período de muestreo en el área de Tránsito céntrico (TC) en la ciudad de Córdoba. La línea representa el límite establecido en el NAAQS (100 ppb).

Las concentraciones más elevadas de SO₂ fueron observadas en la zona industrial de Ferreyra, donde predominan las industrias metal-mecánicas (Fig. 6). El patrón de distribución de las concentraciones de NO₂ y CO fue muy similar, observándose los mayores valores en las zonas con alto tránsito vehicular, especialmente en el centro de la ciudad (Fig. 7 y 8). Respecto a las concentraciones de O₃, éste es un contaminante secundario cuya presencia depende de sus precursores (NO₂ y Compuestos Orgánicos Volátiles - COVs) y de la presencia de radiación solar. Se determinaron altas concentraciones en áreas cercanas a avenidas y a las zonas residenciales de la zona norte (Fig. 9).

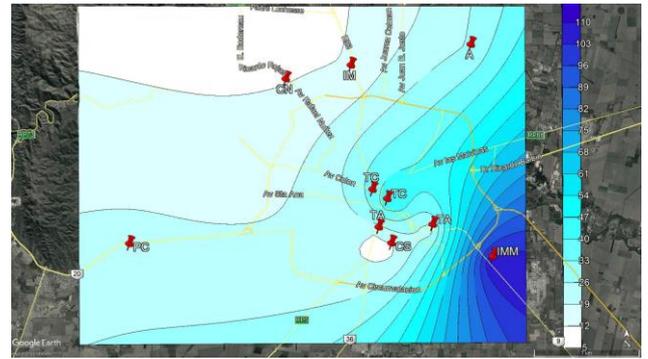


Fig. 6. Distribución espacial de las concentraciones (ppb) de SO₂ (invierno) en la ciudad de Córdoba y alrededores. Se señalan los sitios monitoreados según su categorización de uso del suelo.

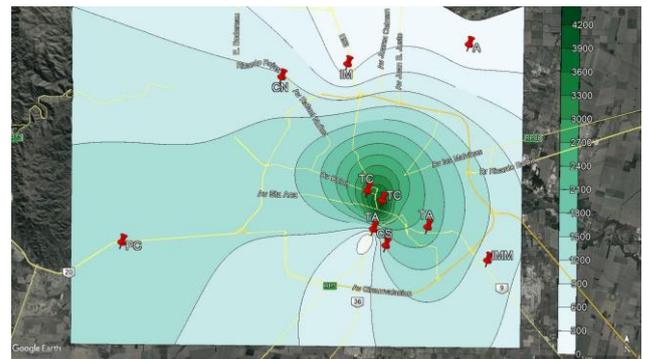


Fig. 7. Distribución espacial de las concentraciones (ppb) de CO (invierno) en la ciudad de Córdoba y alrededores. Se señalan los sitios monitoreados según su categorización de uso del suelo.

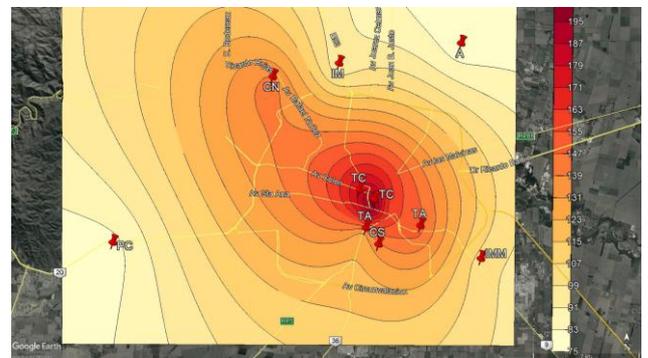


Fig. 8. Distribución espacial de las concentraciones (ppb) de NO₂ (invierno) en la ciudad de Córdoba y alrededores. Se señalan los sitios monitoreados según su categorización de uso del suelo.

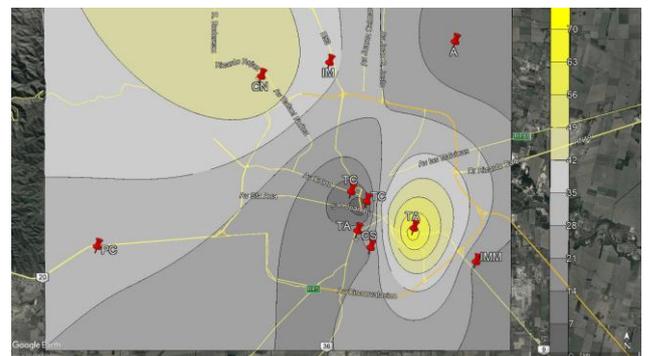


Fig. 9. Distribución espacial de las concentraciones (ppb) de O₃ (invierno) en la ciudad de Córdoba y alrededores. Se señalan los sitios monitoreados según su categorización de uso del suelo.

En todas las estaciones del año, se obtuvieron las concentraciones más elevadas de NO₂, en las zonas de alto tránsito vehicular. Los vehículos de motor son la principal fuente del dióxido de nitrógeno emitido a la atmósfera y a su vez, con el creciente uso de catalizadores de tres vías, las emisiones de éste y de amoníaco desde los automóviles han aumentado (Watmough et al., 2014). Las concentraciones de O₃ mostraron diferencias significativas entre sitios y entre períodos estacionales. En la comparación entre sitios, las concentraciones más elevadas de O₃ ocurrieron en la zona residencial norte, en otoño exclusivamente y en invierno acompañada el sitio de Planta Cementera; en verano en la zona agrícola y en primavera en la zona de industrias metalúrgicas. El O₃ es un contaminante secundario formado en la tropósfera a través de reacciones fotoquímicas entre los NO_x y COVs mediante una serie de reacciones en cadena iniciadas por radicales libres (Kim et al., 2012; Tiwari et al., 2015), por lo que su concentración depende de la presencia y cantidad de sus precursores químicos y además, de la intensidad de la radiación solar y de la temperatura (Bailey et al., 2002). Por ello, presenta tanta variabilidad diaria y puntual según las condiciones del entorno que pudieran afectar la temperatura y radiación. Cabe destacar que, aun cuando las concentraciones más elevadas de NO₂ se presentaron en zonas con alto tránsito vehicular, las concentraciones más elevadas de O₃ no lo hicieron. CN y A, mostraron los mayores valores de ozono; esto podría explicarse considerando las edificaciones en estas zonas que son menores que en áreas urbanas lo que podría resultar en efectos diferenciales en la radiación incidente (Chen et al., 2009) y a su vez, al tener en sus cercanías avenidas de circulación moderada de automóviles, presentaron niveles medios del precursor, NO₂.

Al igual que lo analizado para NO₂, las concentraciones más elevadas de CO se observaron en todas las estaciones en las zonas de alto tránsito vehicular, siendo TC los sitios con las mayores concentraciones. El CO es un contaminante gaseoso producido por la combustión incompleta de combustibles como la madera, petróleo, carbón, gas natural y kerosene (WHO, 2010). Los motores de los vehículos y las industrias en segundo lugar son reconocidos como las fuentes principales de CO en zonas urbanas (Fazlzadeh et al., 2015). Los sitios ubicados en el microcentro de la ciudad, presentan como principal fuente de contaminación, el tránsito vehicular, al igual que los sitios en cercanías a las avenidas de doble circulación. Es interesante destacar que aun cuando en todos los sitios con tránsito vehicular elevado presentaron las concentraciones más elevadas de CO, TC siempre mostró niveles mayores de este polutante. Estos sitios presentan habitualmente largas filas de vehículos detenidos durante mucho tiempo con sus motores en marcha, calles más estrechas que dificultan una rápida dispersión y dilución de los contaminantes. En contraste, en las avenidas el tránsito es rápido, fluido y los vientos adquieren mayor velocidad. Marsico (1974) cita valores de variación en la proporción de componentes del efluente del escape de vehículos con motor a nafta para condiciones de "ralenti" (vehículo detenido con motor girando a su mínima velocidad) y de "cruce" (motor girando a velocidad sensiblemente constante o sea en situaciones de rutas), señalando una proporción 4 a 6 % de CO para el primer caso con 500 a

1000 ppm de Hidrocarburos Totales (HCT), mientras que para el segundo refiere un 1 - 4% de CO con 200 a 300 ppm de HCT. Martínez (1997) observó el mismo comportamiento del CO para la ciudad de Córdoba cuando comparó, utilizando las concentraciones obtenidas del SiMA, sitios ubicados en el microcentro y avenidas dentro de la ciudad.

A fin de poder evaluar la asociación entre los contaminantes y la de éstos con los distintos usos del suelo, se realizó un Análisis Multivariado (ACP) utilizando como criterio de clasificación los sitios categorizados, empleando los datos correspondientes a todos los períodos estacionales. En la Fig. 10 se observa el biplot generado a partir de los dos primeros componentes.

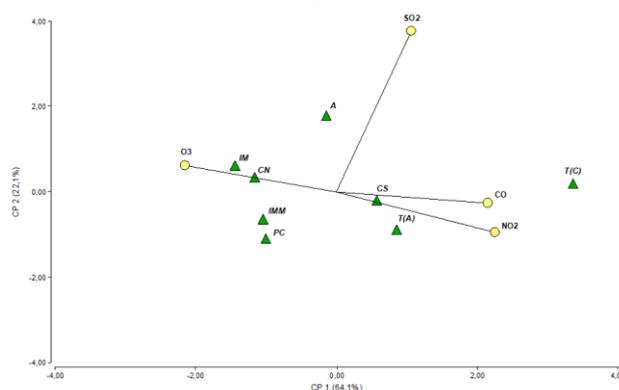


Fig. 10. Análisis de Componentes Principales para la concentración de inmisión (ppb) de los cuatro gases (SO₂, NO₂, O₃ y CO) como variables (círculos) y los sitios clasificados según uso del suelo como criterio de clasificación (triángulos), en la ciudad de Córdoba y alrededores.

El primer eje acumuló el 64% de la varianza y el segundo eje el 22%. Las concentraciones de NO₂, CO y O₃ (de manera inversa) fueron los de mayor peso en el Componente Principal 1 (CP1); mientras que el CP2 estuvo definido solo por las concentraciones de SO₂. El gráfico *biplot* muestra una clara asociación entre CO y NO₂, ambos marcadores de tránsito vehicular, y la de éstos con los sitios de alto tránsito vehicular, TC y TA y en menor extensión con CS. El SO₂ no se asoció fuertemente con ningún uso del suelo, solo lo hizo débilmente con el sitio agrícola. Los sitios CN e IM se asociaron con O₃ y en menor medida con industrias (IMM y PC).

CONCLUSIONES

El muestro automático de contaminantes gaseosos criterio permitió afirmar que dentro de la ciudad existen zonas con distintos niveles de calidad de aire, a lo largo de todo el año.

Los contaminantes con mayor concentración fueron CO y NO₂, ambos provenientes en su mayoría del uso de combustible en los distintos medios de transporte, indicando que la mayor fuente de contaminación en la ciudad de Córdoba es el tránsito vehicular. A pesar de que el CO fue el contaminante mayoritario en la atmósfera, en ningún sitio y período estacional, superó el límite primario (9 ppm media 8 h) establecido por la USEPA. Las áreas industriales presentaron concentraciones medias de 1h de SO₂ mayores a las permitidas; lo mismo ocurrió para las zonas residenciales del norte y sitios agrícolas, reflejando

en estas dos el aporte de SO₂ debido a la quema de basura. Las concentraciones medidas de SO₂ como las de O₃ en la ciudad son relativamente bajas comparadas con otras ciudades del mundo, como Shangai, Beijing, Nueva Delhi, etc. El límite primario establecido por la USEPA (70 ppb) para O₃ no fue sobrepasado en ningún sitio, pero teniendo en cuenta el límite establecido por la OMS (50 ppb) se observó que ambas zonas residenciales (CN y CS) presentaron valores superiores a este límite. Teniendo en cuenta los precursores de este contaminante, los valores de NO₂ no fueron tan elevados en estos sitios en comparación con las zonas con alto tránsito que no mostraron concentraciones importantes de O₃, lo que plantea la necesidad a futuro de evaluar la concentración del otro importante precursor de este contaminante secundario, los COV's. Para el caso de NO₂, las concentraciones obtenidas en invierno en las áreas con alto tránsito vehicular fueron en algunos casos similares a las reportadas para distintas ciudades de China. Comparando los valores obtenidos en otras ciudades del mundo (como Nueva Delhi, Alberta, Salvador, Curitiba y Alioga), Córdoba mostró valores más elevados para este contaminante. Además, de las 8 categorías de los sitios evaluados en la ciudad, se superó el límite primario para NO₂ (100 ppb) en 5 de ellas (CN, CS, TC, TA e IMM). En las zonas con alto tránsito vehicular la concentración media de NO₂ sobrepasa los valores permitidos en todas las estaciones del año, poniendo esto de manifiesto la necesidad de implementar acciones de reducción de este contaminante con urgencia, ya que son sitios en los que además del alto flujo vehicular, la población realiza distintas actividades al aire libre, por lo que estos altos niveles de NO₂ en el aire constituyen un riesgo para su salud, encontrándose los valores más elevados en las estaciones más frías.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente subsidiado por el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCyT-ANPCyT: PICT-2008-1460) y por la Secretaría de Ciencia y Tecnología (SECyT-UNC: 2014).

REFERENCIAS

- Abril, G. A., Wannaz, E. D., Mateos, A. C., & Pignata, M. L. (2014). "Biomonitoring of airborne particulate matter emitted from a cement plant and comparison with dispersion modelling results". *Atmospheric Environment*, 82, 154-163.
- Bailey, R. A., Clark, H. M., Ferris, J. P., Krause, S., & Strong, R. L. (2002). *Chemistry of the Environment*. Academic Press.
- Campos, V. P., Cruz, L. P., Godoi, R. H., Godoi, A. F. L., & Tavares, T. M. (2010). "Development and validation of passive samplers for atmospheric monitoring of SO₂, NO₂, O₃ and H₂S in tropical areas". *Microchemical Journal*, 96(1), 132-138.
- Carreras, H. A., & Pignata, M. L. (2001). "Comparison among air pollutants, meteorological conditions and some chemical parameters in the transplanted lichen *Usnea amblyoclada*". *Environmental Pollution*, 111(1), 45-52.
- Chen, J., Wang, W., Zhang, J., Liu, H., Ren, L., Liu, X. & Wang, X. (2009). "Characteristics of gaseous pollutants near a main traffic line in Beijing and its influencing factors". *Atmospheric Research*, 94(3), 470-480.
- Civan, M. Y., Elbir, T., Seyfioglu, R., Kuntasal, Ö. O., Bayram, A., Doğan, G., & Pekey, H. (2015). "Spatial and temporal variations in atmospheric VOCs, NO₂, SO₂, and O₃ concentrations at a heavily industrialized region in Western Turkey, and assessment of the carcinogenic risk levels of benzene". *Atmospheric Environment*, 103, 102-113.
- Clarke, K., Kwon, H. O., & Choi, S. D. (2014). "Fast and reliable source identification of criteria air pollutants in an industrial city". *Atmospheric Environment*, 95, 239-248.
- Cox, R. M. (2003). "The use of passive sampling to monitor forest exposure to O₃, NO₂ and SO₂: a review and some case studies". *Environmental Pollution*, 126(3), 301-311.
- Fazlzadeh, M., Rostami, R., Hazrati, S., & Rastgu, A. (2015). "Concentrations of carbon monoxide in indoor and outdoor air of Ghalyun cafes". *Atmospheric Pollution Research*, 6(4), 550-555.
- Hu, Y., Zhao, P., Niu, J., Sun, Z., Zhu, L., & Ni, G. (2016). "Canopy stomatal uptake of NO_x, SO₂ and O₃ by mature urban plantations based on sap flow measurement". *Atmospheric Environment*, 125, 165-177.
- Kim, M.J, Park, R.J. y Kim, J-J. (2012). "Urban air quality modeling with full O₃-NO_x-VOC chemistry: Implications for O₃ and PM air quality in a street canyon". *Atmospheric Environment*, 47, 330-340.
- Marsico, A. D. (1974). "Estudio de las condiciones de higiene de la ciudad de Buenos Aires". *Universidad de Buenos Aires*. Buenos Aires ed. 156 pp.
- Martínez, G. J. (1997). "Respuesta química de una especie líquénica a contaminantes atmosféricos y variables ambientales registradas por el sistema de monitoreo del aire (SiMA)". Tesina de graduación académica en Ciencias Biológicas – UNC.
- Olcese, L. E., & Toselli, B. M. (1997). "Effects of meteorology and land use on ambient measurements of primary pollutants in Cordoba City, Argentina". *Meteorology and Atmospheric Physics*, 62(3-4), 241-248.
- Olcese, L. E. and Toselli, B. M. (2002). "Some aspects of air pollution in Cordoba, Argentina". *Atmos. Environ.* 36, 299–306.
- Olcese, L. E., Palancar, G. G., & Toselli, B. M. (2001). "An inexpensive method to estimate CO and NO_x emissions from mobile sources". *Atmospheric Environment*, 35(35), 6213-6218.
- Pires, J. C. M., Sousa, S. I. V., Pereira, M. C., Alvim-Ferraz, M. C. M., & Martins, F. G. (2008). "Management of air quality monitoring using principal component and cluster analysis—part II: CO, NO₂ and O₃". *Atmospheric Environment*, 42(6), 1261-1274.
- Singh, K. P., Gupta, S., & Rai, P. (2013). "Identifying pollution sources and predicting urban air quality using ensemble learning methods". *Atmospheric Environment*, 80, 426-437.
- Tellez J, Rodrigues A, Farjado A. (2006). "Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental". *Rev Salud Pública*. 8(1):108-17.
- Tiwari, S., Dahiya, A., & Kumar, N. (2015). "Investigation into relationships among NO, NO₂, NO_x, O₃, and CO at an urban background site in Delhi, India". *Atmospheric Research*, 157, 119-126.
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). 1970. Definición de los contaminantes criterio.
- Watmough, S. A., McDonough, A. M., & Raney, S. M. (2014). "Characterizing the influence of highways on springtime NO₂ and NH₃ concentrations in regional forest monitoring plots". *Environmental Pollution*, 190, 150-158.
- World Health Organization (WHO). (2010). "WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants". Geneva, Switzerland.
- Xie, Y., Zhao, B., Zhang, L., & Luo, R. (2015). "Spatiotemporal variations of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations between 31 Chinese cities and their relationships with SO₂, NO₂, CO and O₃". *Particology*, 20, 141-149.
- Yoo, J. M., Lee, Y. R., Kim, D., Jeong, M. J., Stockwell, W. R., Kundu, P. K., & Lee, S. J. (2014). "New indices for wet scavenging of air pollutants (O₃, CO, NO₂, SO₂, and PM₁₀) by summertime rain". *Atmospheric Environment*, 82, 226-237.
- Zhang, Q., Shen, Z., Cao, J., Zhang, R., Zhang, L., Huang, R. J., & Zheng, C. (2015). "Variations in PM_{2.5}, TSP, BC, and trace gases (NO₂, SO₂, and O₃) between haze and non-haze episodes in winter over Xi'an, China". *Atmospheric Environment*, 112, 64-71.