

REVISIÓN DE LOS MONITOREOS DE CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

Leonardo Serio; Carolina Puccetti y Josefina Oderigo

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas.
Av. San Martín 4453, Buenos Aires, Argentina.
E-mail: serio@agro.uba.ar

Recibido: 11/05/20

Aceptado: 30/06/20

RESUMEN

El monitoreo de la calidad del aire constituye la base científica para el desarrollo de estrategias para controlar la contaminación atmosférica en áreas urbanas para reducir posibles impactos en la salud de la población. Para ello, es necesario que las mediciones sean espacialmente representativas y sostenidas en el tiempo. El objetivo de este trabajo fue recopilar la información disponible sobre la calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires, con el fin de resumir los resultados principales y hacer un análisis crítico de la situación actual. Como resultado de la revisión, se encontró que se llevaron adelante diferentes campañas de medición de contaminantes durante las últimas cinco décadas, siendo en su mayoría discontinuas. Los datos relevados muestran que la concentración de los contaminantes en el aire está asociada, principalmente, a la intensidad del flujo vehicular y que presenta un ciclo de variación estacional. Mediciones recientes en la Ciudad mostraron valores aceptables de CO y NO₂, pero relativamente altos de material particulado, parámetro que afecta en forma negativa a la salud. En la actualidad, si bien la Ciudad cuenta con estaciones de medición automática y continua ubicadas en diferentes barrios, las mismas son escasas y no tendrían representatividad espacial. Se recomienda la ampliación de la red de medición y la complementación con otros métodos de estimación, como sensores remotos o modelos de simulación.

Palabras clave: contaminación atmosférica, gases, material particulado, ambiente urbano

REVIEW OF AIR QUALITY MONITORING IN THE CITY OF BUENOS AIRES

ABSTRACT

Air quality monitoring constitutes the scientific basis for the development of strategies for controlling air pollution in urban areas and reducing possible impacts on population health. On this aim, measurements must be spatially representative and sustained over time. The objective of this work was to compile the available information on air quality in the city of Buenos Aires, in order to summarize the main results and carry out a critical analysis of the current situation. As a result of this review, it was found that different campaigns have been carried out during the last five decades for measuring pollutants, being mostly discontinuous. The surveyed data shows that the concentration of pollutants in the air is mainly associated with the intensity of vehicular flow and exhibits a seasonal cycle. Recent measurements in the City showed acceptable values of CO and NO₂, but relatively high values of particulate matter, a parameter that affects health negatively. At present, although the city has automatic and continuous measurement stations located in different neighborhoods, they are scarce and do not have spatial representation. Expanding the network and complementing it with other estimation methods, such as remote sensors or simulation models, are recommended.

Key words: atmospheric pollution, gases, particulate matter, urban environment

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los principales problemas que atentan contra la calidad de vida de la población en las grandes ciudades. Las consecuencias se pueden manifestar a través de alteraciones en las propiedades de la atmósfera en distintas escalas, desde la local hasta la global (Fenger, 2009; Ramanathan y Feng, 2009; Baklavov *et al.*, 2016), las que tienen impacto tanto sobre la salud humana (Brunekreef y Holgate, 2002; Kampa y Castanas, 2008; Kim *et al.*, 2015) como sobre la flora, la fauna y la biodiversidad (Bell *et al.*, 2011; Faeth *et al.*, 2011), así como también causan corrosión de materiales (Liu *et al.*, 2015).

La calidad del aire se evalúa determinando la concentración media de distintas especies contaminantes durante un período de tiempo determinado. Las unidades que se utilizan comúnmente para expresar la concentración corresponden a masa de contaminante por unidad de volumen de aire (mg m^{-3} o $\mu\text{g m}^{-3}$) o volumen de contaminante por unidad de volumen de aire, como partes por millón (ppm) o por billón (ppb). Aquellas sustancias para

las cuales se han establecido valores de concentración límite para la exposición de la población se denominan "contaminantes criterio", encontrándose entre ellos algunos gases (CO , NO , NO_2 , SO_2 , O_3), metales pesados (Pb) y material particulado en suspensión, tanto de diámetro menor a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) como menor a $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$). Cada país o jurisdicción dicta sus normas de calidad del aire, que establecen los límites máximos admisibles (LMA) de las concentraciones de los contaminantes criterio para períodos de tiempo establecidos. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido niveles guías de calidad del aire, considerando los efectos sobre la salud provocados por la exposición a estos contaminantes. Como cada país establece los LMA dependiendo de sus características económicas, políticas y sociales, estos suelen diferir de los recomendados por la OMS (Baldasano *et al.*, 2003). En el Cuadro 1 están resumidos los LMA establecidos por la legislación vigente en la Ciudad de Buenos Aires (GCABA, 2006); y los recomendados por la OMS (2005).

Cuadro 1. Límites máximos admisibles (LMA) de concentración de contaminantes atmosféricos en la Ciudad de Buenos Aires (GCABA, 2006) y niveles guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2005).

CONTAMINANTE	PERÍODO	CABA		OMS	
		$\mu\text{g m}^{-3}$	ppb	$\mu\text{g m}^{-3}$	ppb
PM10	24 HORAS	150		50	
	1 AÑO	50		20	
PM2.5	24 HORAS	65		25	
	1 AÑO	15		10	
O ₃	1 HORA	235	120		
	8 HORAS	157	80	100	51
NO ₂	1 HORA	376	200	200	106
	1 AÑO	100	53	40	21
SO ₂	3 HORAS	1300	500		
	24 HORAS	365	140	20	8
CO	1 AÑO	80	30		
	1 HORA	40000	35000	30000	2625
Pb	8 HORAS	10000	9000	10000	9000
	3 MESES	1,5			
	1 AÑO			0,5	

Durante las últimas décadas del siglo XX, la tasa de incremento de la concentración de contaminantes atmosféricos en las principales ciudades de América Latina ha ido a la par con la tasa de crecimiento de la urbanización (Weitzenfeld, 1992). Se estima que más de 100 millones de personas están expuestas a altos valores de contaminación del aire en Latinoamérica, incluso por sobre los niveles guía de la OMS (Bell *et al.*, 2011).

En la Argentina, cerca del 90% de la población vive en núcleos urbanos. En particular, el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), conformada por la ciudad homónima y otros 24 distritos de sus alrededores, alberga a más de 14 millones de habitantes (un tercio de la población total del país) en un área aproximadamente semicircular de sólo 50 km de radio, limitada al NE por el río de la Plata. Si bien es una de las tres megaciudades más grandes de América Latina, sus características geográficas y topológicas difieren sustancialmente de las de otras grandes metrópolis de la región, como San Pablo (Brasil), Santiago (Chile) o la Ciudad de México, donde el problema de la calidad del aire reviste mayor seriedad (Bell *et al.*, 2006; Abrutzki *et al.*, 2013).

Las emisiones de gases y partículas contaminantes en la ciudad de Buenos Aires provienen mayormente de fuentes móviles (vehículos particulares y transporte público), y en menor medida de fuentes fijas (principalmente plantas de generación eléctrica e industrias) (World Bank, 1997; Bogo *et al.*, 2003; Reich *et al.*, 2006; Venegas *et al.*, 2011). Una vez emitidos a la atmósfera, la concentración de los contaminantes se reduce al dispersarse éstos en el aire, proceso que depende principalmente de la velocidad del viento y la altura de la capa de mezcla. Intensidades de viento inferiores a 4 m s^{-1} pueden dar lugar a la acumulación de contaminantes en las áreas urbanas (Gassman y Mazzeo, 2000). En Buenos Aires, la frecuencia de ocurrencia de direcciones de viento desde el río hacia la ciudad es,

en promedio anual, del 52%, pero la velocidad del viento en superficie es inferior a los 4 m s^{-1} en un 55% del tiempo (Martín, 2000; Mazzeo y Venegas, 2004). Otros estudios han determinado que existen elevadas frecuencias de ocurrencia de condiciones adversas para la dispersión de los contaminantes, especialmente durante los meses de invierno (Ulke y Mazzeo, 1998; Gassmann y Mazzeo, 2000; Ulke, 2000; Zeballos, 2015).

El monitoreo de la calidad del aire es una herramienta necesaria para la toma de decisiones, ya que constituye la base científica para desarrollar políticas, establecer objetivos y planificar estrategias para el control de la contaminación. La calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires ha sido, y continúa siendo, objeto de estudio en diferentes proyectos locales e internacionales, ya sea mediante campañas puntuales de medición o mediante monitoreos continuos. Algunos de los resultados de esas mediciones han sido publicados en informes y trabajos de investigación realizados durante las últimas cinco décadas. El objetivo de este trabajo es hacer una revisión de esas publicaciones, resumir sus principales resultados y realizar un análisis crítico de la situación actual.

Primeras mediciones sistemáticas

El impulso inicial para las campañas de medición de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Buenos Aires provino de proyectos internacionales patrocinados por dependencias regionales de la Organización Mundial de la Salud (OMS). En particular, la primera campaña de medición sistemática fue realizada entre 1967 y 1973 en el marco del programa denominado Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (REDPANAIRES). En una estación ubicada en el barrio de Palermo (Sitio 1, Figura 1), se determinaba diariamente las concentraciones de SO_2 y de partículas totales en suspensión (PTS), y se recolectaban muestras mensuales de partículas sedimentables (PS) de mayor



Figura 1. Imagen de Google Earth de la Ciudad de Buenos Aires, con la ubicación de los sitios de monitoreo de calidad del aire. En rojo: estaciones operadas por la APRa. En azul: puntos de muestreo relacionados a proyectos de investigación (sólo se incluyen aquellos donde se midió continuamente durante tres meses o más).

tamaño (Korc y Sáenz, 1999). Un primer análisis permitió detectar que un tercio de los datos excedían los niveles de referencia (los que eran valores arbitrarios, ya que aún no existía legislación al respecto) con una tendencia a disminuir para ambos tipos de partículas, pero a aumentar para el SO_2 (CEPIS, 1982). Teniendo en cuenta estos resultados, a partir de 1978 se prohibió el uso de incineradores domiciliarios de basura en la ciudad (Mayol, 2014).

Más de una década después, en 1987, la ciudad se integró a un proyecto mundial de vigilancia del medio ambiente impulsado por la OMS, denominado Global Environmental Monitoring System (GEMS-AIRE), mediante el cual se pretendía medir los contaminantes del aire más comunes. A los contaminantes monitoreados en el proyecto anterior, se sumaron O_3 , NO , NO_2 y Pb . Lamentablemente, las mediciones resultaron discontinuas y se

abandonaron en 1990, debido a la falta de recursos (Petcheneshsky, 1996).

La escasez de datos confiables en Buenos Aires fue señalada por Kretzchmar (1994), quien realizó una recopilación sobre los niveles de concentración de partículas en suspensión y sus tendencias en las cuatro ciudades más populosas de América Latina. Por su parte, Korc y Sáenz (1999) realizaron un informe para la OMS sobre calidad del aire en la región y ubicaron a Buenos Aires bajo el título "Ciudades con limitada capacidad de monitoreo".

En 1992, la organización no gubernamental Fundación Siglo 21, con la asistencia técnica del Instituto de Química Física de los Materiales, Medio Ambiente y Energía (INQUIMAE, UBA/CONICET), instaló un monitor continuo para la medición de monóxido de carbono (CO) en el microcentro de la Ciudad, en la calle Talcahuano al 400 (Sitio 2, Figura

1). La campaña fue concebida como una iniciativa de tipo promocional, con el fin de ayudar a los porteños a tomar conciencia sobre el flagelo de la contaminación del aire (Gordillo *et al.*, 1995). Durante varios años, los principales medios escritos de difusión masiva publicaron diariamente los valores medios diurnos (promediados entre las 8 y las 16 hs) de concentración de CO. En muchos casos, éstos excedían el valor límite de 9 ppm recomendado por la OMS. Se constató que la concentración de CO acompañaba los cambios de densidad del tránsito a lo largo del día, y tendía a alcanzar niveles peligrosos en las horas pico de las jornadas laborales. Además, se pudo observar que las concentraciones más altas se producían en días húmedos y con vientos en calma (Gordillo *et al.*, 1995).

Según Tolcachier (2008), las concentraciones de CO informadas durante esa campaña se encontraban muchas veces dentro de rangos de valores con consecuencias neurotóxicas. También destacó que los datos no eran extrapolables al resto de la ciudad, ya que se colectaban en un sitio muy particular: una calle angosta que favorecía el estancamiento del aire, donde además circulaban varias líneas de colectivos, con tránsito muy lento o detenido por la presencia de un semáforo en la esquina. Pero lo importante es que resultaban un buen indicador de la baja calidad del aire que respiraban las personas que vivían, trabajaban o transitaban el microcentro porteño.

La serie de trabajos de Bogo y otros (INQUIMAE)

Entre 1995 y 2001, el INQUIMAE realizó una serie de monitoreos de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Buenos Aires, cuyos resultados fueron publicados en varios trabajos científicos (Bogo *et al.*, 1999, 2001, 2003) y una tesis doctoral (Bogo, 2004). En la primera etapa, midieron simultáneamente concentraciones de CO, NO, NO₂ y O₃. Entre octubre y diciembre de 1995, la estación es-

tuvo ubicada en Ciudad Universitaria (Sitio 3, Figura 1), lugar identificado como un área verde, ventosa y alejada del tráfico al NE de la ciudad, en la costa del Río de la Plata (Bogo *et al.*, 1999). Luego la instalaron durante 12 meses consecutivos, entre julio de 1996 y junio de 1997, en una de las principales vías de acceso al microcentro de la ciudad, en la avenida Belgrano al 1500 (Sitio 4, Figura 1) en el barrio de Monserrat. Más tarde, entre noviembre de 1997 y septiembre de 1998, las mediciones fueron realizadas dentro del parque de la Facultad de Agronomía (Sitio 5, Figura 1), otra área verde, donde el tránsito vehicular es casi nulo. En la Figura 2 se muestran los valores medios mensuales reportados en cada sitio.

En Ciudad Universitaria, fueron medidas concentraciones relativamente bajas de los cuatro gases, explicables por la proximidad al río de la Plata y la predominancia de vientos provenientes desde ese sector (Bogo *et al.*, 1999). Los autores notaron que las concentraciones de NO aumentaban cuando la velocidad del viento disminuía o cuando los vientos soplaban desde la ciudad. En la Av. Belgrano, por su parte, se observaron mayores concentraciones de CO, NO y NO₂ que las obtenidas en Ciudad Universitaria, mientras que las concentraciones de O₃ (contaminante secundario producido por la reacción fotoquímica del NO₂ con la radiación solar) fueron menores. Las concentraciones de CO y NO₂ en Agronomía (Bogo, 2004) fueron menores a un tercio de las registradas en la Av. Belgrano, mientras que las de O₃ fueron cuatro veces más altas. Esto último evidencia que existe formación local de este contaminante dentro del parque de la Facultad, por la reacción fotoquímica del NO (proveniente desde afuera del predio) con la radiación solar.

La continuidad de un año de datos, tanto en la Av. Belgrano como en Agronomía, permitió observar un patrón de onda anual caracterizado por un aumento de las concentraciones medias de CO y NO₂ desde febrero

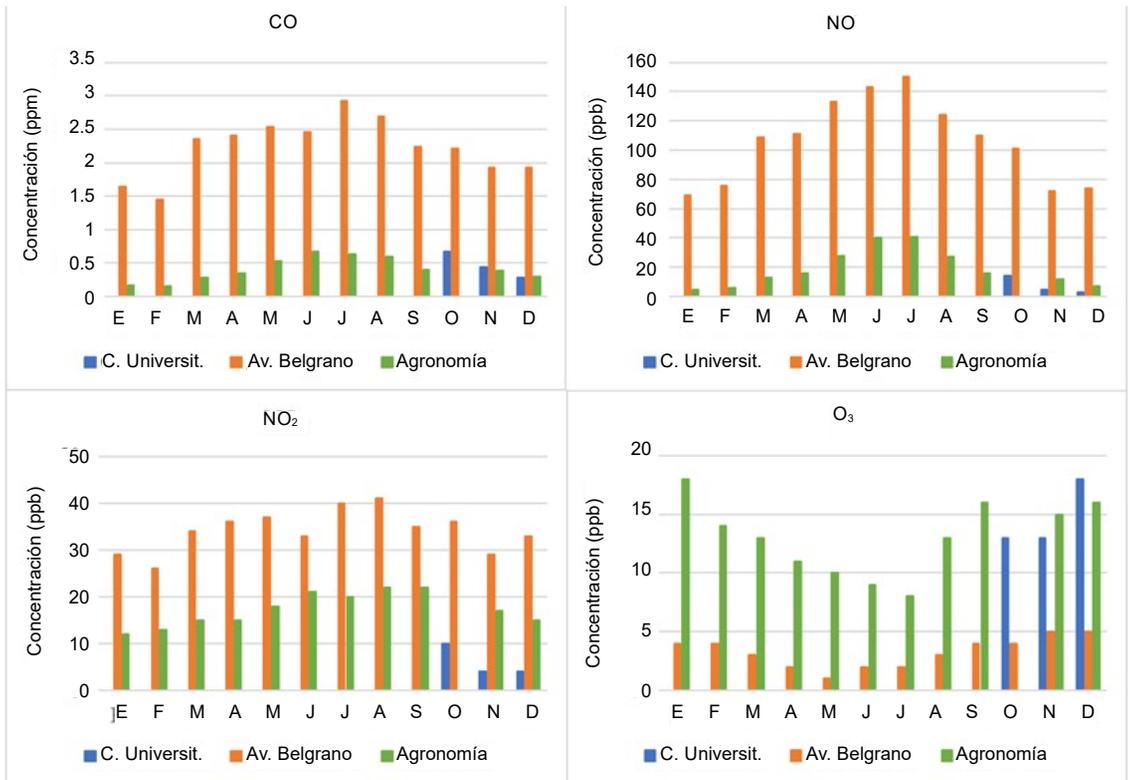


Figura 2. Promedios mensuales de las concentraciones de CO, NO, NO₂ y O₃ observadas en Ciudad Universitaria (octubre-diciembre 1995), Av. Belgrano al 1500 (julio 1996-junio 1997) y Facultad de Agronomía (noviembre 1997-septiembre 1998). Elaboración propia a partir de datos extraídos de Bogo *et al.* (1999) y Bogo (2004).

hasta junio, seguido de una disminución de dichas concentraciones entre julio y enero (Bogo, 2004). La disminución de la concentración de estos contaminantes entre la primavera y el verano fue atribuida a la mayor capacidad de autodepuración de la atmósfera, consecuencia de una mayor velocidad del viento y del aumento de la altura de la capa de mezcla (Ulke, 2000). También se observó que durante los fines de semana la concentración de contaminantes en el macrocentro era mucho menor que durante los días laborales, y que en estos últimos se distinguían dos picos de concentración, uno a la mañana y otro al final de la tarde/principio de la noche. Este patrón resultó casi coincidente con el perfil de tráfico vehicular, por lo que concluyeron que éste era la fuente principal de emisiones de CO y NO₂ en la Ciudad.

La relación entre el tráfico y las concentraciones de CO y NO₂ fue confirmada por Bogo *et al.* (2001) al aplicar un modelo de dispersión gaussiano a los datos horarios de CO registrados en la Av. Belgrano durante el invierno de 1996, en los días laborales. En la simulación, los autores tuvieron en cuenta las emisiones vehiculares, las domésticas (calefacción) y las provenientes de las dos centrales térmicas de generación eléctrica ubicadas al NE de la ciudad, en la zona portuaria de la Costanera Norte. Además de confirmar la fuerte influencia vehicular, entre otras cosas se determinó que los percentiles más altos de concentración de CO coincidían con situaciones de viento en calma.

En la última etapa del trabajo, Bogo *et al.*, (2003) intentaron cubrir la falta de información sobre material particulado en suspensión

en la atmósfera de la ciudad de Buenos Aires. Para ello, realizaron el monitoreo sistemático de material particulado durante 9 meses, entre diciembre de 1998 y septiembre de 1999. El sitio elegido fue el edificio de la Facultad de Farmacia y Bioquímica de la UBA (Sitio 6, Figura 1), ubicado en una calle angosta del macrocentro de la ciudad, con flujo vehicular continuo durante casi todo el día. Allí midieron las concentraciones atmosféricas promedio de 24 horas de PM10 y PM2.5, registrando simultáneamente los niveles de CO. Se determinaron además las concentraciones de una amplia variedad de iones dentro de las muestras de PM10, y de metales pesados en las de PM2.5.

Entre sus resultados, *Bogo et al.* (2003) destacaron que existía una alta correlación entre las concentraciones de PM2.5 y CO, lo que indicaba que provenían mayormente de la misma fuente, o sea del tránsito vehicular. En cambio, la correlación entre concentraciones de PM10 y CO fue menor, lo que les permitió inferir que las fuentes de la fracción gruesa de partículas en suspensión no serían sólo las emisiones vehiculares, sino que debería haber una contribución importante de otras fuentes, como por ejemplo material resuspendido por acción del viento. En general, las concentraciones de iones y metales pesados resultaron similares a las de ciudades grandes de Europa Occidental. Sin embargo, los niveles de Na⁺ y Cl⁻ resultaron más altos que el intervalo típico de referencia, lo que indicaba la presencia de sales de posible origen marino en la atmósfera de Buenos Aires, lo que fue confirmado luego por *Dos Santos et al.* (2011). Por otra parte, destacaron que los niveles de PM2.5 y PM10 eran altos en comparación con las concentraciones típicas de América del Norte y Europa Occidental. En particular, los valores mensuales promedios de PM2.5 estuvieron entre 25 y 45 $\mu\text{g m}^{-3}$, mientras que la legislación actualmente vigente fija un LMA de 15 $\mu\text{g m}^{-3}$ como promedio anual (Cuadro 1). Este es un resultado de alta relevancia, ya que las partículas más finas son las que tienen el mayor impacto ne-

gativo en la salud (*Kim et al.*, 2015) y el mayor tiempo de residencia en la atmósfera.

Algunas campañas puntuales

Durante el invierno de 2001, la Agencia Regulatoria de Electricidad llevó a cabo una breve pero intensiva campaña de monitoreo, con el objetivo de cuantificar los impactos ambientales de las actividades del sector, en particular el aporte a la contaminación del aire debido a las centrales térmicas ubicadas en la costa del Río de la Plata. La primera parte de la campaña consistió en la recolección de muestras de PM10 durante 8 días consecutivos, simultáneamente en 9 sitios ubicados en la zona este de la Ciudad. *Smichowski et al.* (2004) utilizaron estos datos para evaluar la mineralogía del material particulado en suspensión. Entre los resultados más relevantes, destacaron que la concentración encontrada de Pb confirmaba los niveles decrecientes desde la introducción de gasolina sin plomo en 1995 (0,088 $\mu\text{g m}^{-3}$ en 2001, frente a los 3,9 $\mu\text{g m}^{-3}$ de 1994). Como contracara de ello, encontraron que la concentración promedio de S estaba por encima de 3 $\mu\text{g m}^{-3}$, nivel que consideraron como "inesperadamente alto" para Buenos Aires, debido al contenido relativamente bajo de S en los combustibles líquidos y al uso de gas natural en parte de la flota automotor.

Una segunda campaña de monitoreo dentro del mismo proyecto se extendió durante 45 días, entre agosto y septiembre de 2001, en los bosques de Palermo, un área abierta, rodeada de espacios verdes, pero con alto tránsito en las avenidas circundantes. Allí, midieron las concentraciones instantáneas de CO, NO, NO₂, O₃ y SO₂. El análisis de los resultados fue documentado por *Reich et al.* (2006). Los valores obtenidos fueron similares a los reportados previamente por *Bogo et al.* (1999) en Ciudad Universitaria, sitio cercano y con características similares. Como resultado, quedó confirmada la fuerte influencia del tráfico vehicular en las concentra-

ciones de CO y NO₂, además de la presencia de bajos niveles de SO₂. Fueron analizadas también la interdependencia entre las concentraciones de NO₂ y O₃, para las cuales obtuvieron una fuerte correlación negativa durante las horas de mayor insolación, en concordancia con lo encontrado por Bogo (2004) en Agronomía.

Poco después, Reich *et al.* (2009) llevaron a cabo otro estudio para determinar las posibles fuentes de PM₁₀ en la ciudad de Buenos Aires. Para ello, retomaron los datos analizados previamente por Smichowski (2004), a los que les aplicaron diferentes técnicas de modelado para identificar las principales fuentes de contaminación y la contribución de cada una de ellas. Reich *et al.* (2009) determinaron que la principal fuente de contaminación del aire por PM₁₀ es el transporte vehicular, junto con el material proveniente del roce de los neumáticos con el asfalto. Además, estos autores obtuvieron concentraciones de S y Sb mayores a las esperadas; atribuyendo el primero a fuentes secundarias, probablemente sulfato de amonio, y el segundo a las pastillas de freno de los vehículos automotores.

El proyecto BARUCA

Entre 2004 y 2010 se desarrolló el proyecto BARUCA (Buenos Aires Research on Urban Climate and Air Pollution), en cooperación entre instituciones argentinas y alemanas. Arkouli *et al.* (2010) sintetizaron los resultados obtenidos durante una campaña de medición de un año de duración (mayo 2006-mayo 2007), cuyo objetivo fue determinar la distribución temporal y espacial del material particulado en suspensión sobre la ciudad. Analizaron la relación entre las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} y algunas variables meteorológicas, como así también con la capacidad de dispersión de los contaminantes en la atmósfera. Durante la campaña, se midió la concentración de material particulado con fotómetros en un sitio de referencia fijo en el

barrio de Recoleta (Sitio 7, Figura 1) y, en forma rotativa, en otros 6 lugares por períodos de tiempo cortos, de entre 4 y 6 semanas. También se realizaron mediciones al azar en otros 60 puntos de la ciudad con el fin de determinar la distribución espacial de las partículas.

A partir del análisis de un año completo de datos del sitio fijo, se determinó que los LMA diarios de PM₁₀ (150 µg m⁻³) y de PM_{2,5} (65 µg m⁻³) fueron excedidos sólo una vez; mientras que los niveles guía de la OMS (50 y 25 µg m⁻³) fueron superados 36 y 21 días, respectivamente. Resulta preocupante la exposición a largo plazo, ya que el valor anual promedio de PM₁₀ observado (34 µg m⁻³) representa el 70% del LMA anual de la ciudad (50 µg m⁻³), pero excede largamente el correspondiente nivel guía de la OMS (20 µg m⁻³). Para el PM_{2.5}, el valor anual promedio observado fue similar al permitido en la ciudad (15 µg m⁻³), y también excede el valor de referencia de la OMS (10 µg m⁻³). Se determinó, además, que las partículas en el rango de tamaños entre 2,5 y 10 µm, provenientes de la resuspensión del polvo del asfalto y de los procesos de abrasión, son las que dominan la fracción del material particulado (56%).

En las mediciones realizadas en períodos cortos se encontraron mayores concentraciones de material particulado en los sitios ubicados cerca de la calle y a menor altura, con picos máximos en las horas más transitadas. Se observó, además, que la calidad del aire decaía cuando se registraban vientos provenientes desde el sector oeste, y mejoraba cuando soplaban desde el río. Por otra parte, se registró una clara tendencia estacional en las partículas más finas, con mayores concentraciones en invierno y menores en verano, probablemente asociado a las condiciones de ventilación, tal como lo habían destacado Bogo *et al.* (1999). Para PM₁₀, no se pudo distinguir una variabilidad estacional, pero se observó una elevada variación diurna. Debido a su menor tiempo de resi-

dencia en el aire, el PM10 presenta picos a las horas de mayor tránsito vehicular. Asociado también a ello, los resultados de las mediciones al azar determinaron que el PM2.5 está distribuido de forma más homogénea en la ciudad que el PM10.

La red de monitoreo del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires

La Agencia de Protección Ambiental (APrA) es el organismo encargado de realizar las mediciones y el análisis de datos de contaminación del aire en la ciudad. Las tareas de medición comenzaron a principios de la década de 1970, con los proyectos internacionales mencionados al principio de este trabajo. La primera estación, ubicada en el barrio de Palermo (Sitio 1, Figura 1), se mantuvo operativa hasta 2010, cuando el laboratorio de la APrA se trasladó al barrio de Villa Soldati. Hasta 1997, las mediciones de CO y NO₂ se realizaban manualmente y de manera discontinua, luego, con la incorporación de un equipo automático de medición de CO, se logró mayor continuidad. En 2002 comenzó la publicación de los datos en la web del Gobierno de la Ciudad (Mayol, 2014).

Desde hace más de una década, la APrA opera en forma continua y permanente tres Estaciones de Monitoreo Atmosférico totalmente automáticas, con calibración y metodologías estandarizadas y aprobadas por la US-EPA (siglas en inglés de la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU.), cuya ubicación se puede ver en la Figura 1. La estación Parque Centenario (Sitio 8) informa datos desde mayo de 2005 y está ubicada en una zona residencial-comercial cerca del cen-

tro geográfico de la ciudad, con flujo vehicular medio, muy escasa incidencia de fuentes fijas, y próximo a un espacio verde. La estación Córdoba (Sitio 9), por su parte, funciona desde 2009 y está localizada en una zona céntrica, sobre una avenida con gran caudal vehicular y muy escasa incidencia de fuentes fijas. La estación La Boca (Sitio 10) opera también desde junio de 2009 y se emplaza en una zona mixta (residencial-comercial-industrial) en el sudeste de la ciudad, cercana a fuentes de emisión fijas y con flujo vehicular medio-bajo; Los contaminantes atmosféricos monitoreados son CO, NO, NO₂, PM10 (en todas las estaciones), O₃ (en Córdoba y La Boca) y SO₂ (sólo en Córdoba). En junio de 2018, la APrA incorporó a la red una cuarta estación en el barrio de Villa Soldati (Sitio 11, Figura 1), un área residencial-comercial con flujo vehicular bajo, muy escasa incidencia de fuentes fijas y próxima a un espacio verde, cuyos datos pueden ser considerados indicativos de la concentración de fondo en la Ciudad (GCABA, 2020).

La APrA publica los datos diarios de concentración de los tres contaminantes (CO, NO-NO₂-NO₂ y PM10) e informes mensuales de tipo estadístico, con los valores medios diarios, los promedios cada 8 horas y los valores extremos. En ambos casos, se hace una comparación con los LMA de las normas de calidad del aire, fijadas por la Ley 1356 y el Decreto 098/06. Las series completas de datos están disponibles en <https://data.buenosaires.gob.ar/dataset/calidad-aire>.

Un análisis preliminar de los datos obtenidos entre 2016 y 2018 (Cuadro 2 y Figura 3) muestra que los niveles de CO están, en pro-

Cuadro 2. Promedios anuales y valores máximos observados (2016-2018) de las concentraciones de CO, NO₂ y PM10 en las estaciones de monitoreo de Parque Centenario (PC), Av. Córdoba (AC) y La Boca (LB).

CONTAMINANTE	CO (ppm)			NO ₂ (ppb)			PM10 (µg m ⁻³)		
	PC	AC	LB	PC	AC	LB	PC	AC	LB
PROMEDIO ANUAL	0,5	0,7	0,4	16	20	18	24	26	30
VALOR MÁXIMO	3,2	3,3	2,9	59	79	129	93	116	138

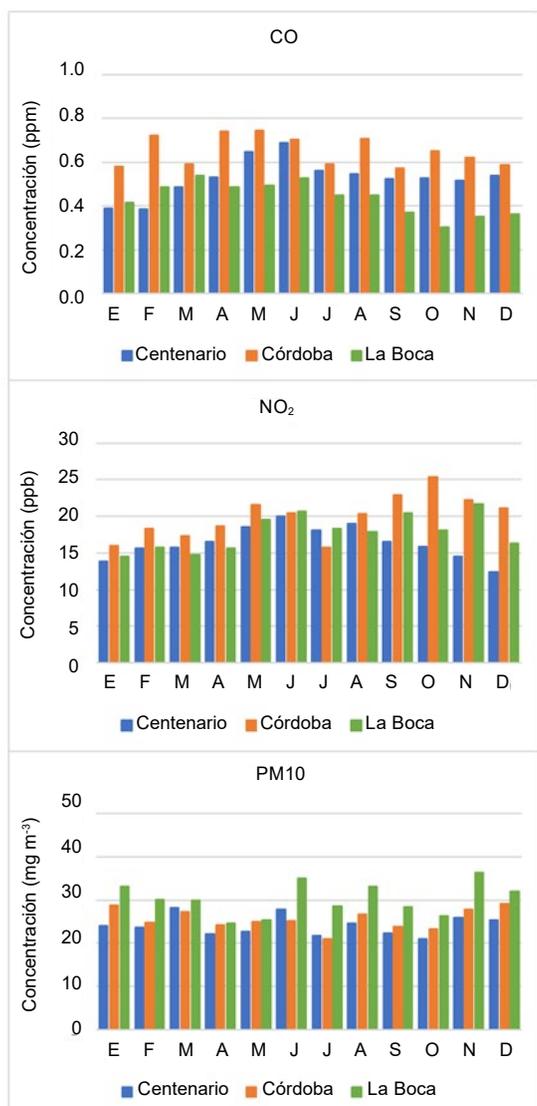


Figura 3. Promedios mensuales de las concentraciones de CO, NO₂ y PM₁₀ observadas en las estaciones de monitoreo de Parque Centenario, Av. Córdoba y La Boca, entre enero de 2016 y diciembre de 2018. Elaboración propia a partir de datos publicados en <https://data.buenosaires.gob.ar/dataset/calidad-aire>.

medio, muy por debajo del LMA, e incluso el máximo valor promedio de 8 horas (3,3 ppm) fue aproximadamente la tercera parte del valor límite (9 ppm). En cuanto al NO₂, los valores medios anuales estuvieron entre 16 y 20 ppb, lo que representa menos de la mitad del

LMA de la legislación local (53 ppb), pero son cercanos al nivel guía de la OMS (21 ppb). El máximo valor horario registrado durante esos tres años fue de 129 ppb, o sea que no hubo casos en que se haya superado el LMA (200 ppb) ni tampoco el nivel guía de la OMS. En cambio, para el PM₁₀ los datos no son tan alentadores. Las concentraciones medias anuales estuvieron entre 24 y 30 µg m⁻³, valores inferiores al LMA (50 µg m⁻³), pero superiores al límite recomendado por la OMS (20 µg m⁻³). Este contaminante presentó mayores valores en la estación La Boca, donde el promedio de 24 horas excedió el nivel guía de la OMS en el 8,3% de los casos (unos 30 días al año).

Consideraciones finales

Si bien la Ciudad de Buenos Aires cuenta con un sistema de medición continua de contaminantes atmosféricos (al menos durante la última década), este puede considerarse insuficiente si se compara con las redes de medición presentes en otras grandes ciudades de Latinoamérica, que suelen tener 10 o más estaciones. Por ejemplo, Santiago de Chile cuenta con 13 estaciones de monitoreo de calidad del aire, Bogotá tiene 13 estaciones activas y la Ciudad de México más de 20 (Clean Air Institute, 2013). Por otro lado, no hay registros oficiales de mediciones de PM_{2.5}, que son las partículas que resultan más perjudiciales para la salud, y los datos de O₃ y SO₂ no son publicados.

La necesaria ampliación de la red de monitoreo se ve dificultada por cuestiones de costos, tanto de adquisición como de mantenimiento del instrumental. Como alternativa, surgen diferentes opciones, aunque todas ellas requieren de datos observados de buena calidad para su validación y calibración. Una de ellas es el uso de sensores remotos. Della Ceca *et al.* (2017) utilizaron imágenes satelitales MODIS para calcular el espesor óptico, un indicador indirecto del contenido total de partículas en la columna atmosférica.

Estas imágenes mostraron que la zona con mayor concentración de aerosoles atmosféricos se encuentra al sudoeste de la ciudad, un área que actualmente no está siendo monitoreada.

Otra alternativa es el uso combinado de inventarios de emisiones y modelos de dispersión de contaminantes. Estos permiten simular la dispersión de los contaminantes y calcular las concentraciones instantáneas y su distribución espacial. Algunos de ellos ya han sido aplicados para estimar la distribución espacial de gases (Venegas *et al.*, 2011) y de material particulado (Martin, 2006).

Por último, el nuevo paradigma en el monitoreo de la calidad del aire a escala urbana apunta hacia las redes de sensores de bajo costo (Karagulian *et al.*, 2019). Algunos prototipos de estos instrumentos han comenzado a aplicarse en otras ciudades argentinas como

Mendoza (Cremades *et al.*, 2013), Córdoba (Diez *et al.*, 2018) y La Plata (Candia *et al.*, 2018). Estos sensores pueden ser una alternativa para extender la red de medición hacia otros barrios, principalmente a aquellos donde mediante otros métodos (sensores remotos o modelos) se han detectados focos de mayor concentración de contaminantes atmosféricos.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad de Buenos Aires, por la financiación del proyecto 20020170200033BA de la programación científica 2018-2019.

A los estudiantes de la Licenciatura en Ciencias Ambientales Agustina Andisco, Emilia Anselmo, Abril Barrios, Marcela Gómez, Pei Tsu Kuo y Santiago Goin, por su colaboración en la lectura y discusión de algunos de los trabajos mencionados en este artículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrutski, R., Ibarra, S., Matus, P., Romero-Lankao, P., Pereyra, V. y Dawidowski, L. (2013). Atmospheric pollution and mortality. A comparative study between two Latin American cities: Buenos Aires (Argentina) and Santiago (Chile). *Int. J. Environ. and Health*, 6 (4), 363-380. doi:10.4236/jep.2012.33033
- Arkouli, M., Ulke, A.G., Endlicher, W., Baumbach, G., Schultz, E., Vogt, U., Müller, M., Dawidowski, L., Faggi, A., Wolf Benning, U. y Scheffknecht, G. (2013). Distribution and temporal behavior of particulate matter over the urban area of Buenos Aires. *Atmos. Pollution Res.*, 1, 1-8. doi:10.5094/APR.2010.001
- Baklanov, A., Molina, L.T. y Gauss, M. (2016). Megacities, air quality and climate. *Atmos. Environ.*, 126, 235-249. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.11.059
- Baldasano, J.M., Valera, E. y Jiménez, P. (2003). Air quality data from large cities. *The Science of the Total Environ.*, 307, 141-165. doi:10.1016/S0048-9697(02)00537-5
- Bell, J., Honour, S. y Power, S. (2011). Effects of vehicle exhaust emissions on urban wild plant species. *Environ. Pollution*, 159 (8-9), 1984-1990. doi:10.1016/j.envpol.2011.03.006
- Bell, M., Davis, D., Gouveia, N., Borja-Aburto, V. y Cifuentes, L. (2006). The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, Sao Paulo, and Mexico City. *Environ. Res.*, 100, 431-440. doi:10.1016/j.envres.2005.08.002
- Bogo, H., Negri, R. y San Román, E. (1999). Continuous measurement of gaseous pollutants in Buenos Aires City. *Atmos. Environ.*, 33, 2587-2598. doi:10.1016/S1352-2310(98)00270-2
- Bogo, H., Gómez, D., Reich, S., Negri, R. y San Román, E. (2001). Traffic pollution in a downtown site of Buenos Aires City. *Atmos. Environ.*, 35, 1717-1727. doi:10.1016/S1352-2310(00)00555-0
- Bogo, H., Otero, M., Kreiner, A., Ozafrán, M. y Negri, R. (2003). Study of atmospheric particulate matter in Buenos Aires. *Atmos. Environ.*, 37, 1135-1147. doi:10.1016/S1352-2310(02)00977-9
- Bogo, H. (2004). *Monitoreo y análisis de la contaminación atmosférica en la Ciudad de Buenos Aires* (Tesis Doctoral). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Recuperado de: http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3759_Bogo.pdf

- Brunekreef, B. y Holgate, S. (2002). Air pollution and health. *Lancet* 360, 1233-1242. doi:10.1016/S0140-6736(02)11274-8
- Candia, A., Represa, S., Giuliani, D., Luengo, M., Porta, A. y Marrone, L. (2018). Soluciones para SmartCities: propuesta de un sistema de monitoreo de la calidad del aire basado en una red LoRaWAN con sensores portátiles. *I Congreso Argentino de Ciencias de la Informática y Desarrollo de Investigación*. Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/73116>.
- CEPIS (1982). *Red Panamericana de Muestreo de la Contaminación del Aire (REDPANAIRE). Informe Final 1967-1980*. División de Protección de la Salud Ambiental. Serie Técnica 23. CEPIS-OPS. Lima, Perú. 73 p.
- Clean Air Institute (2013). *La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica*. Clean Air Institute, Washington D.C. 28 p. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/calidad-aire-america-latina-una-vision-panoramica>
- Cremades, P., Castro, F., Fernández, R., Clausen, R. y Puliafito, E. (2013). Desarrollo de un monitor abierto de calidad del aire (MACA). *Séptimo Encuentro de Investigadores y Docentes de Ingeniería*. San Rafael, Mendoza, Argentina. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/306442802_DESARROLLO_DE_UN_MONITOR_ABIERTO_DE_CALIDAD_DEL_AIRE_MACA
- Della Ceca, L., Micheletti, M.I. y Piacentini, R. (2017). Atmospheric particulate matter variability during 2014 at Buenos Aires City (Argentina) comparing ground-based measurements and satellite data. *MDPI Proceedings* 1, 180-192. doi:10.3390/ecas2017-04152
- Diez, S., Guizzo, E., Fichetti, T. y Britch, J. (2018). Allin-Wayra: una estación experimental para el monitoreo continuo de la calidad del aire empleando sensores de bajo costo. *Rev. Fac. Cs. Exactas, Físicas y Naturales (U.N. Córdoba)*, vol 5, 45-49. Recuperado de: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/22896>
- Dos Santos, M., Dawidowski, L., Smichowski, P., Ulke, A.G. y Gómez, D. (2011). Factors controlling sea salt abundances in the urban atmosphere of a coastal South American megacity. *Atmos. Environ.* 59, 483-491. doi:10.1016/j.atmosenv.2012.05.019
- Fenger, J. (2009). Air pollution in the last 50 years – From local to global. *Atmos. Environ.* 43, 13-22. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.061
- Faeth, S., Bang, C. y Saari, S. (2011). Urban biodiversity: patterns and mechanisms, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1223, 69-81. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05925.x
- Gassmann, M.I. y Mazzeo, N. (2000). Air pollution potential: regional study in Argentina. *Environ. Manag.* 25, 375-382. doi:10.1007/s002679910029
- GCABA (2006). Decreto Reglamentario 198/06 (Ley 1356). *Boletín Oficial de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires*, 8 de marzo de 2006. Recuperado de: <https://boletinoficial.buenosaires.gob.ar/normativaba/norma/83624>
- GCABA (2020). *Control Ambiental*. Jefatura de Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Secretaría de Ambiente, Agencia de Protección Ambiental. <https://www.buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/controlambiental>. Consultada el 9/3/2020.
- Gordillo, G., Aramendía, P. y Fernández Prini, R (1995). ¿Buenos Aires en Buenos Aires? *Ciencia Hoy* 31. Recuperado de: <http://cienciahoy.org.ar/1995/08/buenos-aires-en-buenos-aires/>
- Kampa, M. y Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environ. Pollution* 151, 362-367. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012
- Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S. y Borowiak, A. (2019). Review of the Performance of Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring. *Atmosphere* 10, 506. doi:10.3390/atmos10090506
- Kim, K-H., Kabir, E. y Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environ, Int.* 74, 136-143. doi:10.1016/j.envint.2014.10.005
- Korc, M. y Sáenz, R. (1999). *Monitoreo de la Calidad del Aire en América Latina*. Programa de Control de Contaminación del Aire, CEPIS, OPS. Lima, Perú. 22 p. Recuperado de: <http://www.monitoreoambiental.com/download/14.%20Monitoreo-Aire-latam.pdf>
- Liu, B., Wang, D-W., Guo, H., Ling, Z-H. y Cheung, K. (2015). Metallic corrosion in the polluted urban atmosphere of Hong Kong. *Environ. Monit. Assess.* 187, 4112-4122. doi: 10.1007/s10661-014-4112-z
- Martin, P. (2000). *Persistencia del viento y de las condiciones de estabilidad atmosférica en la ciudad de Buenos Aires* (Tesis de Grado). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.

- Martin, P. (2006). *Contaminación del aire por material particulado en la Ciudad de Buenos Aires* (Tesis Doctoral). Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Mayer, H. (1999). Air Pollution in cities. *Atmos. Environ.* 33, 4029-4037. doi:10.1016/S1352-2310(99)00144-2
- Mayol, M.L. (2014). *Monitoreo de la calidad del aire en Buenos Aires*. Taller Regional de Metrología y Retos Tecnológicos en las Ciencias del Clima y la Energía Renovable. Montevideo, Uruguay. Recuperado de: <https://www.nist.gov/document/marialauramayolpdf>
- Mazzeo, N. y Venegas, L. (2004). Some aspects of air pollution in Buenos Aires City (Argentina). *Int. J. Environ. and Pollution*, 22, 365-378. doi:10.1504/IJEP.2004.005675
- OMS (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005*. Organización Mundial de la Salud. Ginebra, Suiza. 24 p. Recuperado de: https://apps.who.int/iris/bitstream/10665/69478/1/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf
- Petcheneshsky, T. (1996). *Situación del monitoreo de la calidad del aire en la República Argentina. Proyecto GEMS-AIRE/OPS/OMS*. Ministerio de Salud y Acción Social, República Argentina. 26 p. Recuperado de: http://www.msal.gov.ar/politicassocioambientales/images/stories/descargas/recursos/1997_tpetcheneshsky_calidad_del_aire_en_la_ra.pdf
- Ramanathan, V. y Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmos. Environ.* 43, 37-50. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.063
- Reich, S., Magallanes, J., Dawidowski, L., Gómez, D., Groselj, N. y Zupan, J. (2006). An analysis of secondary pollutants in Buenos Aires City. *Environ. Monit. Assess.* 119, 441-457. doi 10.1007/s10661-005-9035-2
- Reich, S., Robledo, F., Gómez, D. y Smichovski, P. (2009). Air pollution sources of PM10 in Buenos Aires City. *Environ. Monit. Assess.* 155, 191-204. doi:10.1007/s10661-008-0428-x
- Tolcachier, A.J. (2008). *Contaminación del aire en áreas urbanas*. Libro virtual IntraMed. Recuperado de http://www.intramed.net/sitios/libro_virtual4/6.pdf.
- Ulke, A.G. (2000). Air pollution potential in Buenos Aires city, Argentina. *Int. J. Environ. and Pollution* 14, 400-408. doi: 10.1504/IJEP.2000.000562
- Ulke, A.G. y Mazzeo, N. (1998). Climatological aspects of the daytime mixing height in Buenos Aires city, Argentina. *Atmos. Environ.* 32, 1615-1622. doi:10.1016/S1352-2310(97)00396-8
- Venegas, L., Mazzeo, N. y Pineda Rojas, A. (2011). Evaluation of an emission inventory and air pollution in the Metropolitan Area of Buenos Aires. In: D. Popovic (Ed.). *Air quality - Models and applications*. IntechOpen, London, pp 261-288. doi:10.5772/18767
- Weitzenfeld, H. (1992). Air pollution problems in Latin America. *Bull. PanAmerican Health Org.*, 26 (1), 18-29. Recuperado de: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/27058>
- Zeballos, R.N. (2015). *Análisis estadístico de los factores meteorológicos relacionados con la calidad del aire de la ciudad de Buenos Aires* (Tesis de Grado). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 41 p.