

# Calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires

## Air quality in the city of Buenos Aires, Argentina

### Autor

Salvador Enrique Puliafito, Código ORCID 000 0001 9085 6870

### Contacto

[epuliafito@frm.utn.edu.ar](mailto:epuliafito@frm.utn.edu.ar)

### Institución

Grupo de Estudios de la Atmósfera y el Ambiente (GEAA), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, CONICET, Mendoza, Argentina

### Resumen

*Se estudió la calidad del aire en el área de la Ciudad de Buenos Aires (CABA) combinando: a) análisis de datos de NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> de tres estaciones de monitoreo; b) organización de un inventario de emisiones; c) modelización de la calidad del aire utilizando WRF / CALPUFF en tres períodos (marzo-abril, julio-agosto y noviembre-diciembre 2017). El modelo fue capaz de capturar las variaciones espaciales y temporales de la calidad del aire en CABA. Las condiciones de calidad del aire fueron buenas, con valores medios diarios anuales de  $26 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub> y  $22 \pm 6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de NO<sub>2</sub>; superando el 3% del año los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub> y  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2.5</sub> y el 2% los  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de NO<sub>2</sub>. Sin embargo, la simulación indicó que las áreas de alto flujo de tráfico (carreteras y accesos) en los picos horarios pueden superar los  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>2.5</sub> y  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de NO<sub>2</sub> el 4% de los casos, especialmente entre las 7 y 8 de la mañana y entre las 18 y 20 de la tarde. La contaminación relacionada con el tráfico fue la fuente predominante, por lo que toda mejora en este sector redundará en beneficio de la salud poblacional.*

Palabras claves: Calidad del aire, emisiones, modelos, mediciones, Buenos Aires.

### Abstract

*Air quality in the City of Buenos Aires (CABA) was studied by combining a) NO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> data analysis from three monitoring stations; b) organization of an emissions inventory; c) air quality modeling using WRF / CALPUFF in three periods (March-April, July-August and November-December 2017). The model was able to capture the spatial and temporal variations of the air quality in CABA. Air quality conditions were good, with mean annual daily values of  $26 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of PM<sub>10</sub> and  $22 \pm 6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of NO<sub>2</sub>; exceeding 3% of the year the  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of PM<sub>10</sub> and  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of PM<sub>2.5</sub> and 2% the  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of NO<sub>2</sub>. However, the simulation indicated that in areas with high traffic flow (roads and accesses), hourly peaks can exceed  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of PM<sub>2.5</sub> and  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of NO<sub>2</sub> in 4% of the cases, especially between 7 and 8 a.m. and between 6 and 8 p.m. Traffic-related pollution was the predominant source, so any improvement in this sector will benefit the health of the population.*

Keywords: Air quality, emissions, model, measurements, Buenos Aires

## 1. Introducción

Los cambios económicos, sociales y espaciales ocurridos desde mediados de la década de 1970 desencadenaron la transformación de las ciudades generando grandes cambios en el uso del suelo. Los procesos de concentración urbana, vinculando redes de ciudades, incentivaron la construcción de infraestructura urbana, especialmente relacionada con el transporte, como una estrategia de gobiernos e inversionistas privados para mejorar las economías locales, regionales y globales [1]. En consecuencia, el crecimiento de los centros de población resultó en un aumento de la contaminación del aire, el ruido, el efecto de isla de calor urbano [2], una mayor demanda de energía (es decir, mayores emisiones de gases de efecto invernadero) y el consumo de agua; todos juntos afectando el bienestar humano y el medio ambiente. La contaminación del aire, por tanto, aparece como un problema complejo claramente asociado a los centros urbanos y regiones industrializadas [3,4]. Aproximadamente la mitad de la población total del mundo vive en ciudades medianas y grandes, por lo tanto, es esencial evaluar los niveles de calidad del aire para evaluar el posible impacto en la salud de la exposición a contaminantes [5]. Muchos efectos de la contaminación sobre los ecosistemas y los materiales están bien identificados y documentados [6]; incluidos los costos económicos indirectos asociados a la mala calidad del aire [7].

En América Latina (y Argentina), los problemas de transporte derivados de esta rápida urbanización han aumentado la motorización, la congestión y los accidentes en detrimento del transporte público y no motorizado (es decir, caminar y andar en bicicleta). Se han propuesto varias políticas urbanas (pero se han ido poniendo en práctica lentamente) para mejorar la calidad del aire. Una lista no exhaustiva incluye: definir zonas de emisiones bajas o nulas en las áreas del centro; adoptar estrategias para fomentar un mayor uso de la bicicleta y el scooter; viajes compartidos; redistribución del espacio público (es decir, nuevas áreas verdes); establecimiento de planes de gestión de estacionamientos; promoción del transporte público, especialmente autobuses eléctricos; definir nuevos cargos por congestión y esquemas tributarios para desalentar el uso de los vehículos privados, entre otros. Sin embargo, la movilidad y la accesibilidad están estrechamente relacionadas con el crecimiento económico y las libertades personales; por lo tanto, cualquier estrategia de mitigación sugerida debe tener en cuenta un marco realista de las necesidades de movilidad actuales [8 - 11]. A pesar de las fuertes campañas de educación

y concientización que promueven los beneficios sociales y ambientales del uso del transporte público: los sistemas de trenes suburbanos, tranvías, subterráneos, denominados LRT (Light Rapid Transit) y sistemas de autobuses BRT (Bus Rapid Transit) solo han brindado un mayor acceso al transporte público a los sectores no motorizados de ingresos bajos / medios, pero poco han alentado a nuevos usuarios de transporte público. Afortunadamente, en los últimos años las encuestas recientes indican una importancia creciente del transporte público [10]. Aunque las ciudades latinoamericanas enfrentan problemas similares, actualmente se están explorando nuevas oportunidades para opciones de transporte bajas en carbono. Lamentablemente, la reciente pandemia del COVID-19 ha deteriorado esta tendencia de mejora en el uso del transporte público por considerarse un lugar privilegiado de altos contagios.

Con el fin de proteger la salud de los ciudadanos y el medio ambiente, se han establecido niveles umbral para las diferentes concentraciones de contaminantes atmosféricos como PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles. En consecuencia, muchas ciudades han instalado dispositivos de medición automatizados para monitorear el estado del medio ambiente atmosférico. La técnica más simple para evaluar patrones de contaminación urbana a escala local implica la interpolación de concentraciones ambientales de estas redes de monitoreo existentes [12]. Sin embargo, los datos medidos de estas estaciones no representan necesariamente otras áreas más allá de su vecindad inmediata, ya que los contaminantes en áreas urbanas pueden variar en órdenes de magnitud en escalas espaciales. Además, el comportamiento temporal de los contaminantes primarios y secundarios cambia considerablemente entre el día y la noche debido a la radiación solar, lo que hace que las mediciones medias diarias sean insatisfactorias para explicar, por ejemplo, episodios de alta contaminación.

Los modelos de calidad del aire (MCA) son herramientas matemáticas que simulan los procesos físicos y químicos que involucran a los contaminantes del aire a medida que se dispersan y reaccionan en la atmósfera. El uso de modelos de calidad del aire mejora las limitaciones de las redes de monitoreo al proporcionar predicciones de la distribución temporal y espacial de los niveles reales de contaminación. Los estudios de modelado, en combinación con el monitoreo de la calidad del aire, son herramientas esenciales y complementarias para las estrategias de control de la contaminación del aire a largo y corto plazo. Así, los MCA se han

convertido en una alternativa válida para los gestores ambientales para regular el establecimiento de emisiones; controlar el cumplimiento de los niveles reales de contaminación, predecir el impacto de las nuevas instalaciones en la salud humana, seleccionar la mejor ubicación para las estaciones de monitoreo, entre otros. Recientemente, en el marco del concepto de ciudades inteligentes [13] e internet de las cosas [14], se contempla el uso de una densa red de sensores semiconductores pequeños y de bajo costo asociados a nuevos protocolos de comunicaciones de banda ancha, y modelado de pronóstico, que permitirá una evaluación en tiempo real de la calidad del aire en las ciudades.

El objetivo de este trabajo es evaluar la calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires, Argentina, especialmente la contribución de las emisiones relacionadas con el tráfico. Por lo tanto, se presentará un inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos, una evaluación de la calidad del aire mediante estaciones de monitoreo. Además, se describirá el uso de MCA, comparando las salidas temporales y espaciales con las estaciones de monitoreo durante tres períodos (marzo-abril, julio-agosto y noviembre-diciembre 2017). Finalmente, se presentará algunas conclusiones sobre los beneficios y costos ambientales del actual sistema de transporte en Buenos Aires.

## 2. Materiales y métodos

A fin de modelar la calidad del aire en la Ciudad de Buenos Aires, es necesario preparar cierta información básica que afecta tanto las emisiones de contaminantes como su dispersión. Estos datos son: a) topografía y usos de suelos de la ciudad; b) inventario o mapa de emisiones, esto es, caracterización de las fuentes de emisión: fuentes puntuales (chimeneas), fuentes residenciales y fuentes vehiculares y c) meteorología de la zona. Dependiendo del detalle especificado, los mapas de emisiones se construyen, en un proceso de abajo hacia arriba, recopilando datos de la actividad. Es decir, es necesario conocer los consumos de combustible, el número de vehículos, la generación de energía, entre otros datos. Si se usa enfoque de arriba hacia abajo se utilizan datos de las actividades nacionales agregadas (es decir, población, consumo total de energía, producto interno bruto, etc.). Luego para ambos casos, una vez conocido el nivel de la actividad se multiplica por factores de emisión específicos.

La metodología general aplicada se basa en la normativa europea recopilada en el Programa

Europeo de Seguimiento y Evaluación (EMEP) [15] y se ha descrito en detalle en otro lugar [16-18].

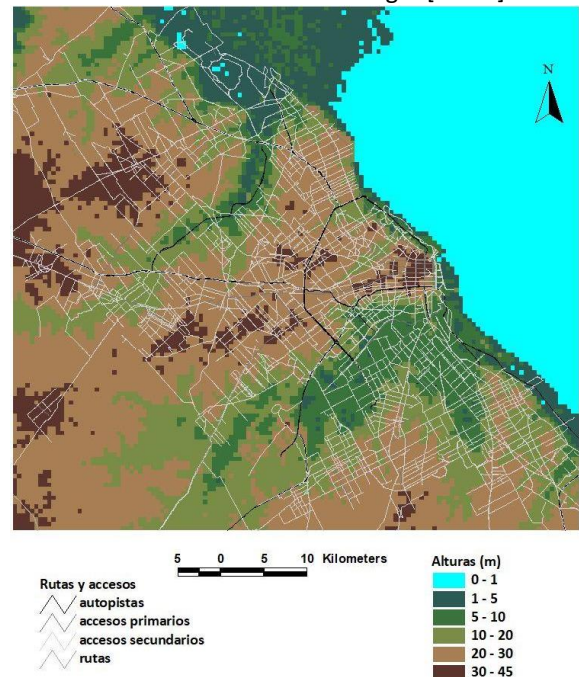


Figura 1: Topografía del área metropolitana del Gran Buenos Aires. Elaboración propia.

Brevemente, las emisiones se calculan siguiendo la ecuación general (1).

$$E(p) = \sum [A(i, j) * F(i, j, p)] \quad (1)$$

donde  $E$  es la emisión total (es decir, t/año) de un contaminante  $p$ ;  $A$  es la actividad del sector  $i$ , para la tecnología  $j$ ; y  $F(i, j, p)$  es el factor de emisión para ese sector, tecnología y contaminante. Por ejemplo, las emisiones (t/año) de CO ( $p$ ), correspondientes al consumo anual de gasolina ( $j$ ), del sector automotor privado ( $i$ ).

El inventario se calculó por cada sector individual en base a los siguientes pasos: primero, identificar la fuente de emisión en sus coordenadas geográficas (latitud y longitud); segundo, asignar la actividad específica que contribuye a esta emisión a cada coordenada; tercero, aplicar factores de emisión específicos para cada especie, fuente y actividad; cuarto, organizar la información en un mapa (latitud, longitud); y quinto, desarrollar índices, tablas, figuras y estadísticas.

Para incorporar la información a ser modelada se preparó una grilla de 500 m x 500 m con una extensión de 40 x 25 km. Cada celda incluye información típica como número de viviendas, número de habitantes, tipo de consumo hogareño o comercial, tipo de calle, número de vehículos, etc.

La Figura 1 muestra la topografía del área de estudio, mientras que la Figura 2 muestra la distribución de usos de suelo.

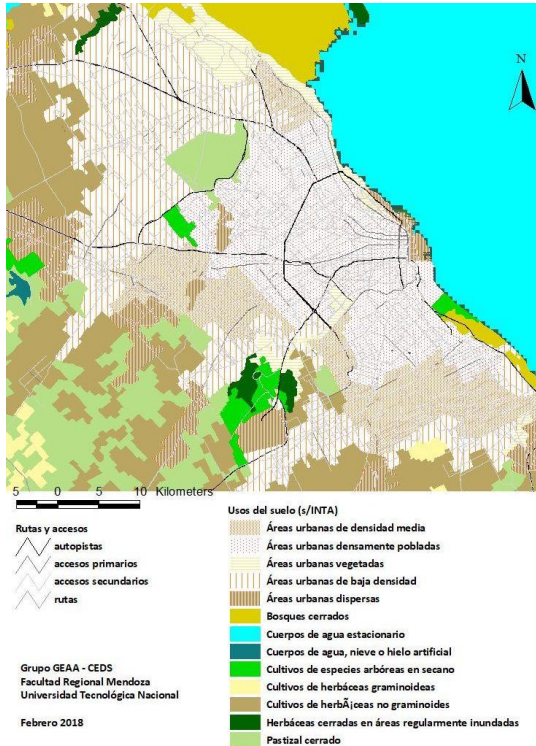


Figura 2: Usos del suelo y distribución espacial urbana. Elaboración propia.

## 2.1 Emisiones vehiculares

Para estimar las emisiones vehiculares, la Ecuación (1) se puede reescribir, en función del número de vehículo, su tipo y combustible utilizado. Las emisiones totales generadas por el sector transporte, pueden determinarse a partir de tres factores principales:

$$E(p) = \Sigma [N(i, j) * L(i, j) * F(i, j, p)] \quad (2)$$

Donde  $E(p)$  [p. ej. t/año] es la emisión total para el tiempo considerado,  $N$  es el número de vehículos circulantes de tamaño  $i$  en ese periodo o frecuencias de los recorridos usando el combustible  $j$ ,  $F$  es el factor de emisión promedio para un contaminante determinado en g/km por vehículo o medio de transporte y  $L$  es la distancia media recorrida en km por vehículo. Debe notarse que  $F$ , a su vez es una función del tipo y antigüedad del vehículo, tipo de combustible utilizado, velocidad y régimen de marcha entre otras variables. Las emisiones de los  $n$  segmentos de calle  $E_{CALLE}$  se sumaron dentro de cada celda de una grilla  $E_{CELDA}$ .

$$E_{CELDA}(x, y, p) = \Sigma_n [E_{CALLE}(x, y, p)] \quad (3)$$

$E_{CALLE}$  para los  $n$  segmentos de calle, dentro de una celda de  $500 \times 500$  m, se calcula usando la Ecuación (2).

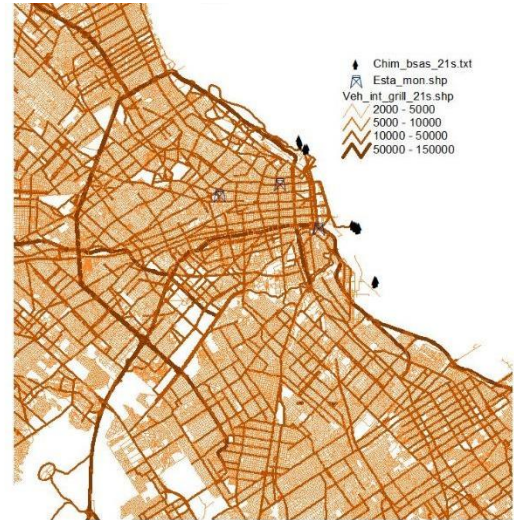


Figura 3: Flujo vehicular medio diario promedio anual (TDMA). Elaboración Propia.

Tabla 1: Consumo de combustibles del sector transporte para el Gran Buenos Aires

Variable	Nafta	Gas oil	GNC
Flota <sup>a</sup>	4.739	1.982	644
Consumo <sup>b</sup>	13.786	6.196	1.177 <sup>c</sup>

(a) miles de vehículos activos; (b) m<sup>3</sup>/día; (c) miles m<sup>3</sup>/día. Fuente: Puliafito et al, 2017 [16]

Tabla 2: Emisiones diarias del sector vehicular del Gran Buenos Aires (40 x 50 km<sup>2</sup>) en t/día

CO	NO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	PM10	PM2.5	SO <sub>2</sub>
1.004	120	18.351	3,15	1,50	1,13

Fuente: Fuente: Puliafito et al, 2017 [16]

La Tabla 1 indica el consumo de combustible en el área del Gran Buenos Aires, por la actividad vehicular. La Tabla 2 muestra las emisiones diarias (t/día) correspondientes a este sector. La Figura 3 muestra los flujos vehiculares promedios diarios anuales [16, 17] para el Gran Buenos Aires. Estos datos se estimaron a partir de mediciones de flujo de Vialidad Nacional y Provincial de Buenos Aires y de la venta/consumo de combustible en la zona según se describe en [17]. La Figura 4 muestra las emisiones de NO<sub>2</sub> del sector vehicular

## 2.2 Emisiones residenciales y centrales térmicas

La actividad y consumo de las centrales termoeléctricas se registran mensualmente en el Ministerio de Energía [19] y en la agencia de distribución eléctrica [20]. Se conoce la ubicación de cada planta de energía y se representa como una fuente puntual. La información de la central

eléctrica incluyó las máquinas y tecnologías disponibles, (CC: ciclo combinado, TV: vapor turbo, TG: gas turbo, DI: diesel) y el respectivo consumo de combustible para cada máquina (GN: gas natural, FO: Fuel-Oil; GO: Gas-Oil, CM: carbón mineral y BD: Biodiesel).

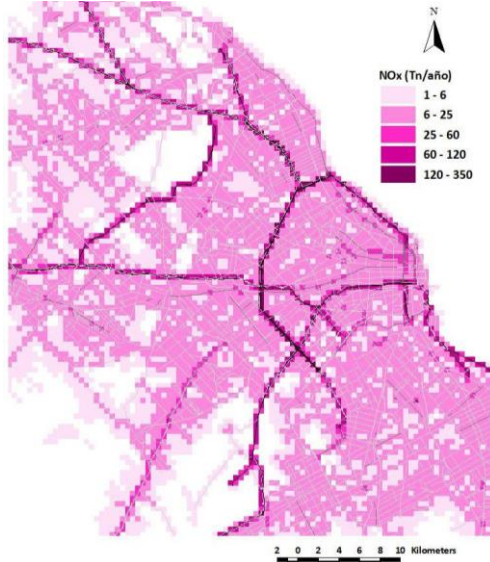


Figura 4: Emisiones anuales de óxidos de nitrógeno provenientes del sector vehicular (t/año/celda)

La emisión de cada máquina y planta se calcula de acuerdo con la Ecuación (1), utilizando los factores de emisión adecuados y otros datos específicos como altura y diámetro de las chimeneas, temperatura y velocidad de escape de los gases. En la Tabla 3 se resume el consumo anual de las centrales térmicas ubicadas en el entorno del Gran Buenos Aires, cuyas emisiones totales (g/s) se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3: Consumo anual combustibles centrales térmicas

FO (t)	GN (1000 m <sup>3</sup> )	GO (t)
1.380.000	3.284.600	717.190

Fuente: Puliafito et al, 2017 [16]

Tabla 4: Suma de Emisiones de chimeneas de las centrales térmicas (g/s)

NOx	CO	N2O	SO2	PM10	PM2.5
1,103	120	52	1,245	8	7

Fuente: Fuente: Puliafito et al, 2017 [16]

La Figura 5 muestra la densidad de viviendas en el área metropolitana del Gran Buenos Aires.

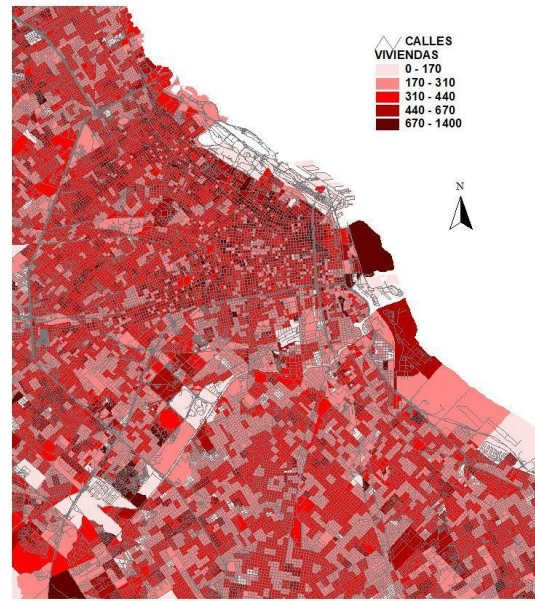


Figura 5: Densidad de viviendas del Área Metropolitana de Buenos Aires. Elaboración Propia.

Este mapa indica el número de hogares y la composición de la población en una resolución muy fina para las ciudades y más gruesa para las áreas rurales se completa estos datos con información sobre necesidades básicas insatisfechas (NBI) para incluir las diferencias en el consumo de los hogares. El principal combustible residencial utilizado para calentar y cocinar en los centros urbanos es el gas natural, cuyo consumo se conoce mensualmente para cada provincia. Para distribuir espacialmente este consumo se utilizó información del censo de hogares y un mapa de fracciones censales de la Oficina Nacional de Estadística de Argentina [21]. En menor proporción, especialmente en las zonas rurales, se utilizan otros combustibles para calefacción y cocina como la madera, el carbón y la biomasa. Asumimos una tasa de consumo para cocinar y calefacción por hogar de 2.7 Mg (base seca) para aquellos hogares que solo usan biomasa, y de 0.25 Mg para el resto de los hogares [16]. Las emisiones por uso doméstico ( $E_{RESID}$ ) de combustible ( $F_{COMB}$ ) en cada celda se calculan de la siguiente manera:

$$E_{RESID}(x, y, p) = \sum_k Rg(x, y, k) \times F_{COMB}(k, p) \quad (4)$$

y

$$Rg(x, y, k) = (Hg(x, y, k) * Rd(x, y, k)) / Hd(x, y, k)$$

Siendo  $Rg$  el consumo residencial de combustible  $k$  considerado en la celda  $(x, y)$ ;  $Hg$  es el número de hogares en la misma celda que consumen

combustible  $k$ ;  $H_d$  es el número total de hogares en el departamento  $d$  y  $R_d$  es el consumo de combustible  $k$  en el departamento  $d$ . Esta desagregación se realizó para cada tipo de combustible utilizado para cocinar y calentar.

La Tabla 5 estima las emisiones correspondientes al sector residencial y comercial por el uso de gas natural en cocinas y calefacción.

Tabla 5: Emisiones del sector residencial Gran Buenos Aires (40 x 50 km<sup>2</sup>) (t/día)

NO <sub>2</sub>	CO	PM	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
71,5	58,5	5,75	0,61	27.714	1,87

Fuente: Puliafito et al, 2017 [16]

La Figura 6 muestra las emisiones de material particulado (t/año) provenientes del sector residencial [16] especialmente del consumo hogareño y residencial de gas natural y leña. Las emisiones provenientes del consumo de energía eléctrica se tuvieron en cuenta en las emisiones de las centrales térmicas de la zona.

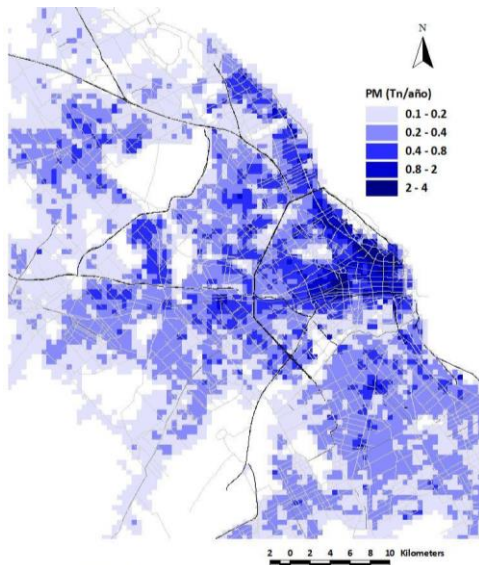


Figura 6: Emisiones anuales de material particulado provenientes del sector residencial (t/año/celda).  
Elaboración Propia.

Este conjunto de datos, determina las fuentes principales de emisión, que se usarán para establecer el sistema de modelado y cálculo de la calidad del aire.

### 2.3 Configuración del modelo

El Modelo de Calidad del Aire seleccionado fue el sistema WRF / CALPUFF. El Weather Research and Forecasting Model (WRF) [22, 23], es un modelo de

pronóstico meteorológico mantenido por el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y otros centros de investigación [24, 25]. El modelo WRF se inicializa utilizando datos meteorológicos de análisis usando modelos globales, del NCEP, que describe los campos tridimensionales de temperatura, velocidad y dirección del viento y humedad en cuadrículas globales de 0.5 x 0.5 grados preparadas operativamente cada seis horas para todo el mundo.

Las observaciones meteorológicas de superficie se obtuvieron de la estación meteorológica del aeropuerto local en Aeroparque (34 ° 34 'S, 58 ° 30' W) y Ezeiza (34 ° 49 'S 58 ° 31'W).

Se definieron tres dominios para reducir la escala de las propiedades físicas de la atmósfera con una resolución de 36, 12 y 4 km. El dominio más grande se centró en 34,6°S - 58,5°W (esquina SW: 43,6°S, - 67,5°W, con un ancho de 18°x18°. El segundo dominio: esquina SW: 37,6°S - 61,5°W, con ancho de 6°x 6°; se definió el tercer dominio en la esquina SO: 35,6°S - 59,5°W, con ancho de 2°x2°. El resto de las parametrizaciones se describen en [24, 25]. Se modelaron 30 días entre el 30 de marzo y el 30 de abril, 13 de julio a 13 de agosto y 13 nov-13 dic del año 2017.

El sistema de modelado CALPUFF es un modelo de dispersión de sople gaussiano de estado no estable, de múltiples capas y múltiples especies [26]; capaz de simular los efectos en el tiempo y el espacio de diversas condiciones meteorológicas sobre el transporte de contaminantes.

El sistema tiene tres componentes: CALMET, un modelo meteorológico que genera campos tridimensionales cuadrículados por hora de vientos y temperaturas y campos bidimensionales de parámetros como altura de mezcla, características de la superficie y parámetros de dispersión. CALPUFF propiamente dicho que contiene el modelo de transporte y dispersión emitido por fuentes modeladas, utilizando los campos generados a partir del modelo meteorológico. CALPOST es la herramienta de post-procesamiento diseñada para resumir los resultados de las simulaciones (concentraciones horarias o flujos de deposición) de CALPUFF.

La EPA de EE. UU. recomienda el modelo para simular los efectos de la dispersión de contaminantes en el transporte de alcance local a medio, normalmente entre 50 y 200 km. La resolución usada fue de celdas 500 m en una zona de 40 x 25 km.

A fin de modelar estas emisiones se consideraron tres tipos de fuentes: a) fuentes puntuales: se incluyeron 20 chimeneas de las centrales térmicas

ubicadas en la zona., b) fuentes de área o residenciales: por consumo de gas natural por cocina y calefacción y c) emisiones del tránsito vehicular; éstas se modelaron como fuentes de área.

### 3. Resultados

#### 3.1 Evaluación de los datos de monitoreo

A fin de evaluar la calidad del aire en la Ciudad de Buenos Aires se evaluaron las mediciones de NO<sub>2</sub>, PM10 y PM2.5: a) del monitoreo del Gobierno de la CABA (GCABA) [27] en sus tres estaciones de Calle Córdoba, Parque Centenario y La Boca. La Figura 7 muestra los puntos de monitoreo.

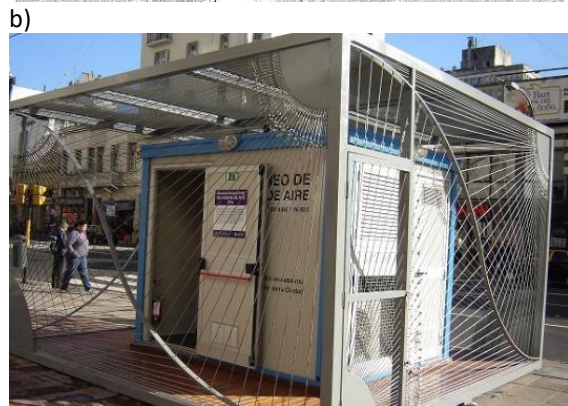
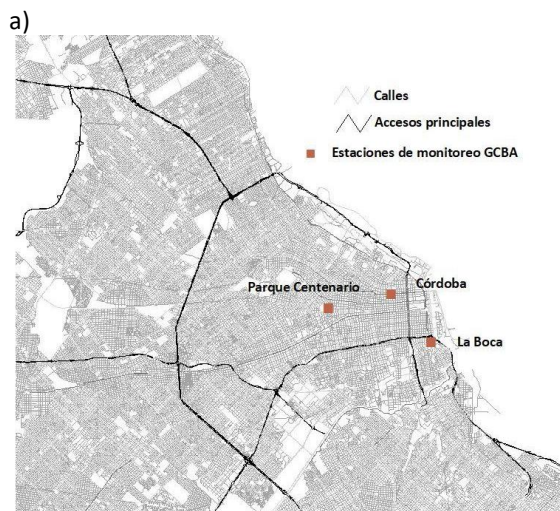


Figura 7: a) Ubicación de las estaciones de monitoreo; b) Estación Calle Córdoba [27]

Se usaron aproximadamente 1 año de monitoreo diario y horario. Estas mediciones pueden analizarse desde una variación horaria, diaria o estacional. La Figura 8 muestra el promedio de 1 año de mediciones según la hora del día para las tres estaciones de Calle Córdoba, Parque Centenario y La Boca. Se aprecia claramente un máximo en horas de la tarde-noche y una disminución en las horas de madrugada. Estas siguen claramente la variación de

los ciclos horarios de la actividad vehicular (hogar-trabajo-hogar).

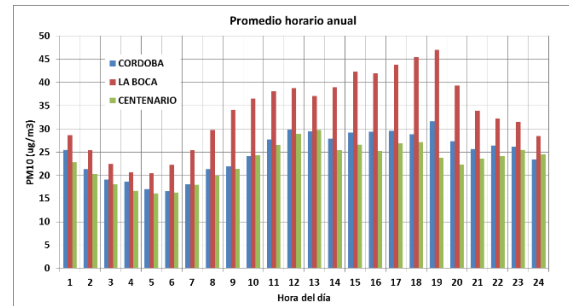


Figura 8: Variación horaria del promedio anual para PM10 (µg/m<sup>3</sup>) medido en tres estaciones de monitoreo GCABA [27]. Elaboración Propia.

Se suma además la variación de la altura de capa de inversión, que en general, es más baja en las horas nocturnas y más alta en las horas diurnas. A mayor altura de la capa de inversión mayor capacidad de dispersión de los contaminantes. La Tabla 6 y Tabla 7 muestra las estadísticas de las mediciones de PM10.

Tabla 6: Estadística de valores horarios de PM10 (µg/m<sup>3</sup>)

Variable	CDB	LB	CEN
Meh	24,91	32,74	22,97
Mxh	394,79	371,21	266,00
Des	15,03	25,23	14,56
Med	22,00	26,59	20,00
Num	8830	10025	8749

CDB. Córdoba, LB: La Boca; CEN: parque Centenario. Meh: media horaria, Mxh. Máxima horaria, Des: Desviación estándar; Med: mediana; Num: número de datos.

Tabla 7: Estadística de valores diarios de PM10 (µg/m<sup>3</sup>)

Variable	CDB	LB	CEN
Med	25,41	30,79	23,11
Mxd	93,04	146,6	67,00
Des	12,53	18,05	11,58
Med	23,24	26,89	21,00
Num	329	359	347

CDB. Córdoba, LB: La Boca; CEN: parque Centenario. Meh: media diaria, Mxh. Máxima diaria, Des: Desviación estándar; Med: mediana; Num: número de datos.

La Figura 9 muestra la variación anual de PM10 medido en las estaciones de GCABA. Se ve un ciclo anual en el que se combinan aspectos meteorológicos que se derivan de la frecuencia y

dirección de los vientos y de la presencia de lluvias, combinado con la actividad propiamente dicha (semana laboral, vacaciones, etc.). La variación estacional es de  $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

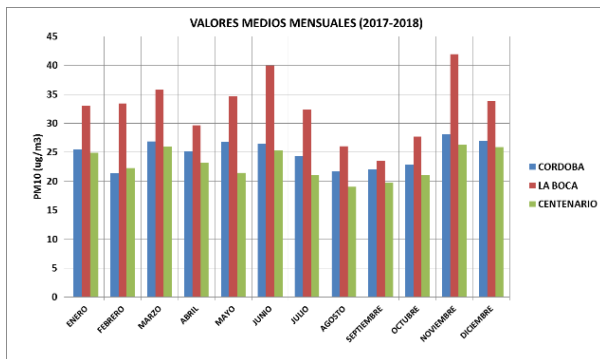


Figura 9: Promedio mensual para PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) medido en tres estaciones de monitoreo del GCABA [27]. Elaboración Propia.

La Figura 10 muestra las curvas de frecuencias de distribución para los datos horarios de PM10 de las estaciones de mediciones. Se infiere de esta figura que el 50% de los valores está por debajo de los  $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (variable según la estación de monitoreo –ver mediana en Tabla 6), asimismo el 92% de los datos están por debajo de los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el 98% de los datos horarios están por debajo de los  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . También se puede interpretar que unas 300 horas (sobre 8760 horas en el año) los valores superan los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  o que en 100 horas en el año se superan los  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

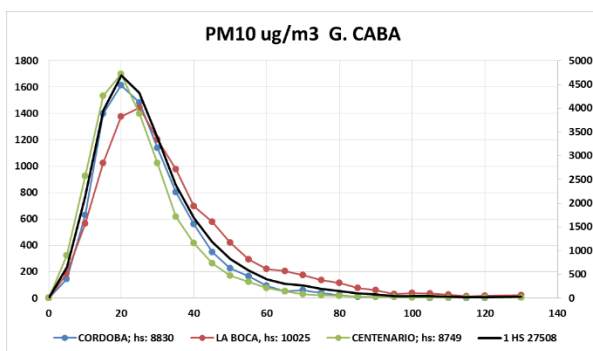


Figura 10 Frecuencia de distribución de los datos horarios medidos en tres estaciones de GCABA [27]. Elaboración Propia.

Se ve además que la estación La Boca tiene valores de PM10 superiores a las de Parque Centenario o Calle Córdoba. Esto se debe a la influencia de las zonas industriales de Dock Sud y Centrales térmicas de la zona sur y este de CABA. La distribución de datos diarios indica que el 50% de los valores está por debajo de los  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (variable según la

estación de monitoreo –ver mediana en Tabla 7) asimismo el 94% de los datos están por debajo de los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y el 99% de los datos diarios están por debajo de los  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Tabla 8: Estadística de valores anuales diarios de óxidos del nitrógeno: NO, NO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub> (ppb) para la estación Calle Córdoba, año 2017

Córdoba	NO <sub>2</sub> (ppb)	NO <sub>x</sub> (ppb)	NO (ppb)
<b>Recuento</b>	331	331	331
<b>Media</b>	21,79	61,72	39,94
<b>Mediana</b>	22,00	57,00	34,00
<b>Máximo</b>	42,00	181,00	139,00
<b>Desv. Est</b>	6,46	28,64	24,00

(En condiciones normales, 1ppb =  $1,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de NO<sub>2</sub>)

La Figura 11 (y Tabla 8) muestra los promedios diarios mensuales de óxidos de nitrógenos en una estación de GCABA (Córdoba). Muestra cuatro columnas: el promedio diario (24HS), el promedio matutino entre las 0 y las 8 hs, el promedio entre las 8 y 16 hs y el promedio vespertino entre 16 y 24 hs. Estos promedios muestran por un lado las variaciones estacionales y por el otro el aporte a diferentes horas del día, coincidente con la mayor o menor afluencia de vehículos en la zona.

Cómo ya se mencionó, para PM10 las variaciones estacionales están asociadas por un lado a la actividad vehicular de cada época del año, (vacaciones, período escolar, etc.) y las diferentes situaciones meteorológicas (por mayores lluvias, vientos, capas de inversión, etc.). El ciclo diario vehicular se aprecia claramente en la Figura 11

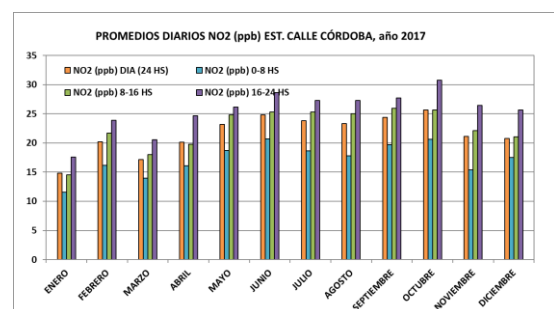


Figura 11: Promedios diarios medidos de NO<sub>2</sub> (ppb) en la estación de calle Córdoba GCABA [27]. Elaboración Propia.

Se aprecia en los datos una alta correlación entre PM10 y NO<sub>2</sub> debido a que ambos tipos de contaminantes provienen de las mismas fuentes vehiculares. Se ve en Figura 12 para NO<sub>2</sub> (y Figura 8 para PM) claramente la variación diaria del flujo vehicular respecto de la hora del día.



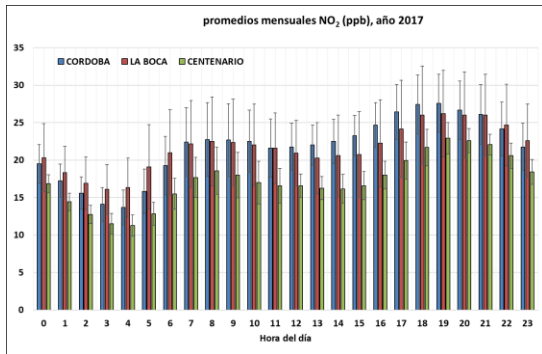


Figura 12: Promedios horarios anuales de NO<sub>2</sub> (ppb) en la estación de calle Córdoba, GCABA. [27].  
Elaboración Propia.

De 0 a 5 va reduciéndose hasta alcanzar un mínimo a las 5 de la mañana, donde luego a partir de las 6 hs. comienza a incrementarse rápidamente llegando a una meseta a partir de las 9-10 hs. Este valor oscila levemente con algún descenso hasta las 15 hs. A partir de las 16 hs. comienza a crecer nuevamente con el comienzo del ciclo de “regreso al hogar” con un pico a las 19 hs. A partir de allí comienza a descender suavemente hasta las 5 de la mañana siguiente. Si se compara las variaciones diurnas con el ciclo anual, parece que las variaciones diurnas son más importantes que las variaciones anuales.

### 3.2 Calibración del modelo con mediciones

Para calibrar los resultados del modelo se usaron tres estaciones de monitoreo de la Ciudad de Buenos Aires ubicadas en La Boca (Brasil 100), Parque Centenario y Calle Córdoba (Córdoba y Roque Saenz Peña). En las figuras siguientes se mostrará la salida del modelo para aquellos sitios coincidentes con las estaciones de monitoreo, para las mismas fechas de simulación y medición.

Debe notarse que esta modelación se realiza en el ámbito de una estructura urbana compleja con edificios de alturas variables, etc., que no se modelan aquí (recordar que las celdas son de 500 m x 500 m). Por ello bajo estas condiciones se considera que la modelación captura adecuadamente las variaciones de los contaminantes en las diversas estaciones.

La Figura 13 muestra la comparación de la variación horaria promedio de NO<sub>2</sub> de la salida del modelo (trazo rojo) con las mismas medidas para las mediciones de la estación de monitoreo de La Boca, comprando las variaciones por día laborable, domingos y feriados y el promedio mensual. La Figura 14 muestra dos series temporales para las estaciones de Córdoba y Parque Centenario, para PM10. Con las mismas consideraciones hechas

anteriormente los valores simulados responden adecuadamente a las variaciones diarias y horarias.

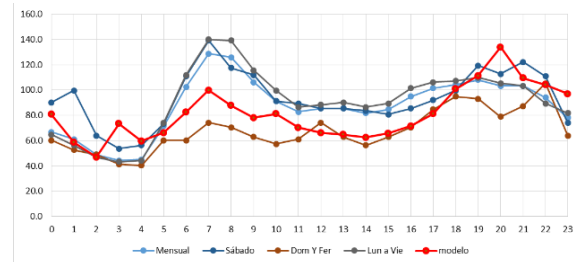


Figura 13: Comparación de mediciones y modelo (trazo rojo) para NO<sub>x</sub> en calle Brasil (La Boca).  
Elaboración Propia.

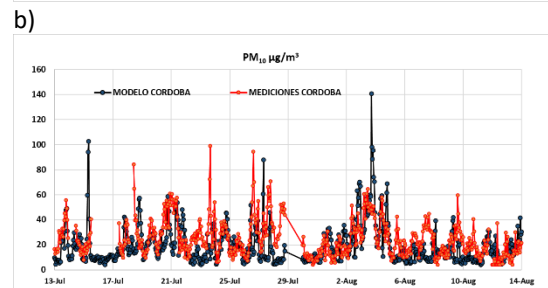
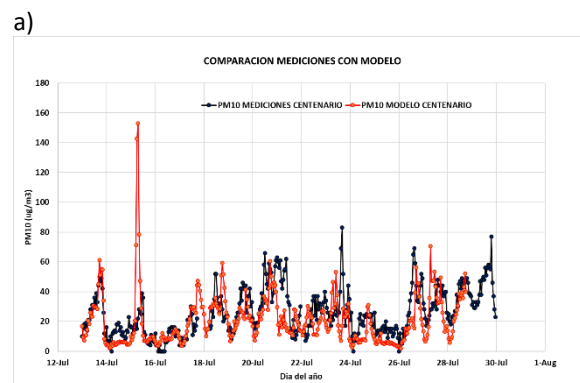


Figura 14: Comparación de mediciones (trazo negro) y modelo (trazo rojo). A) Estación Centenario; b) estación Córdoba. Elaboración Propia.

### 3.3 Variación espacial

Una vez visto que la modelación responde adecuadamente a los promedios y series temporales, se puede evaluar la variación espacial de las concentraciones ambientales, ya no sólo en las estaciones de monitoreo, sino en toda la zona modelada. El modelo permite obtener variaciones horarias o diarias y otros tipos de estadísticas regionales.

La Figura 15 muestra la variación espacial de los promedios diarios para noviembre de 2017. Se aprecia que las zonas cercanas a las autopistas y

accesos principales tienen un nivel elevado de concentraciones, dado el flujo muy intenso de vehículos. La zona central al oeste y sur de Parque Centenario también presenta zonas de valores intermedios de PM2.5.

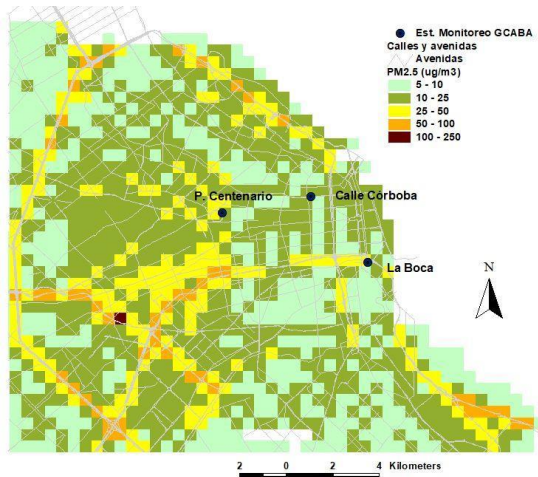


Figura 15: Variación espacial de PM2.5 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de 24 horas, promedio para noviembre de 2017. Elaboración Propia.

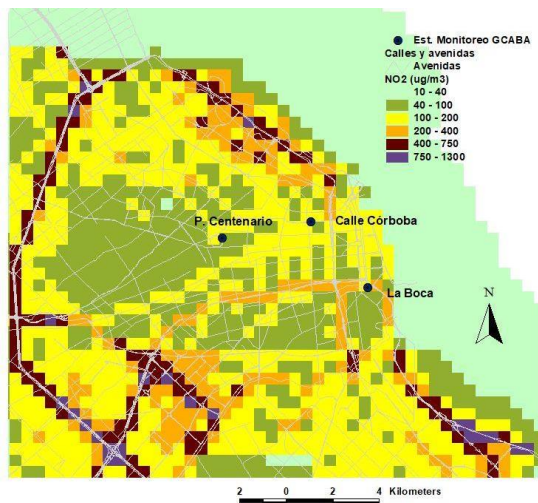


Figura 16: Variación espacial de NO<sub>2</sub> ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) de 24 horas, promedio para abril de 2017. Elaboración Propia.

La Figura 16 representa un gráfico con la variación espacial promedio horaria calculada para abril de 2017. Se aprecia valores muy elevados en la zona de autopistas, e intermedios en zonas aledañas a ésta, mostrando claramente la influencia de las emisiones del tráfico vehicular.

Muchas otras figuras se podrían presentar, sin embargo, éstas dan una apreciación breve de la capacidad de los modelos de detectar zonas con contaminación elevada, que las estaciones de monitoreo no están detectando. Por ello se podría

plantear la elaboración de un sistema combinado permanente de pronóstico (modelo) y monitoreo.

#### 4. Discusión

Las directrices y normas de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) [28], sugieren para PM2.5: 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual y 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media de 24 horas. Para PM10 se establece 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media de 24 horas. Para NO<sub>2</sub> se indica 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual y 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para la media de una hora. Las normas de CABA indican para PM10 un valor de referencia de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual y 150  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media diaria. Para NO<sub>2</sub> los valores de referencia son 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de media anual y 376  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (200 ppb) para la media de una hora.

Por lo tanto, de la estadística anual de los datos de GCABA podríamos inferir lo siguiente:

1. PM10: la media anual es 26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con una desviación estándar de 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La distribución de datos diarios indica que el 50% de los valores está por debajo de los 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; asimismo el 94% de los datos están por debajo de los 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y el 99% de los datos diarios están por debajo de los 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . También se puede interpretar que unos 10 días (sobre 365 días en el año) o 300 horas (sobre 8760 horas anuales) los valores superan los 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  o que en 4 días en el año (o 100 horas al año) se superan los 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .
2. PM2.5: la media anual es 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con una desviación estándar de 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La mediana de los datos horarios indica que el 50% está por debajo (o encima) de 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el 92% de los datos está por debajo de 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y sólo el 2% de los datos está por encima de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El 3% de los días del año (unos 11 días) se superarían los 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM2.5.
3. NO<sub>2</sub>: la media anual es 33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con una desviación estándar de 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La mediana de los datos horarios indica que el 50% está por debajo (o encima) de 17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; el 92% de los datos está por debajo de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y sólo el 2% de los datos está por encima de 62  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El 3% de los días del año (unos 11 días) se superarían los 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM2.5.
4. Los datos más elevados de La Boca pueden asociarse a la combinación de fuentes industriales + fuentes vehiculares, mientras que en las otras estaciones sea mayoritariamente de fuentes vehiculares (92%).

Entonces se ve que la calidad del aire en CABA no supera las normas de la ciudad según los datos de las estaciones, pero según las recomendaciones de la OMS se estaría muy cerca del límite y superando algunos picos estos valores. Por otra parte, según la modelación existen zonas de contaminación

elevada en las cercanías de las autopistas y grandes aglomeraciones de vehículos. Habría que mover alguna de las estaciones más cercanas a esos puntos para corroborar esta situación.

## 5. Conclusiones

Se estudió la calidad del aire en el área de la Ciudad de Buenos Aires combinando análisis de datos de NO<sub>2</sub> y PM<sub>10</sub> de tres estaciones de monitoreo; preparando un inventario de emisiones; y ejecutando una modelización de la calidad del aire utilizando WRF / CALPUFF en tres períodos (marzo-abril, julio-agosto y noviembre-diciembre 2017). El modelo fue capaz de capturar las variaciones espaciales y temporales de la calidad del aire en CABA. El análisis temporal muestra que los niveles de calidad del aire en las estaciones, en general es bueno, superándose los mismos sólo en menos del 2% del período, se puede deducir que unos 11 días al año se superarían las recomendaciones de la OMS. El estudio de simulación indicaría que en zonas de alto flujo vehicular (autopistas y accesos) se estarían superando los promedios horarios anuales de 400 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub> y 100 µg/m<sup>3</sup> de PM<sub>10</sub> en especial entre las horas 7 y 8 hs. en la mañana y en la tarde entre las 18 y 20 hs.

La fuente principal de emisiones de contaminantes en el área evaluada la constituyen las fuentes vehiculares. Toda mejora en la promoción del transporte público (vehículos con bajas emisiones o emisiones cero como el transporte eléctrico) y una menor afluencia de vehículos privados contribuirá a mejorar la calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires.

## 5. Referencias

- [1] Cohen et al., 2004: Cohen, J., Catherine J. Morrison Paul; Public Infrastructure Investment, Interstate Spatial Spillovers, and Manufacturing Costs. *The Review of Economics and Statistics*; 86 (2):551–560. <https://doi.org/10.1162/003465304323031102>
- [2] Oke, T.R., 1989. The micrometeorology of the urban forest. *Journal of Phil. Trans. R. Soc. Lond. B* 324, 335–349.
- [3] Fenger, J., 1999. Urban air quality. *Atmospheric Environment*, 33(29), 4877-4900.
- [4] de Leeuw, 2001. E. Global and Local (Glocal) Health: The WHO Healthy Cities Programme. *Global Change & Human Health* 2, 34–45. <https://doi.org/10.1023/A:1011991014805>
- [5] Brunekreef & Holgate, 2002 Brunekreef B, Holgate ST. Air pollution and health. *Lancet*. 2002;360(9341):1233-42 [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8).
- [6] Fowler et al., 2009. Fowler, D., Pilegaard, K., Sutton, M. A., Ambus, P., Raivonen, M., Duyzer, J., et al. (2009). Atmospheric composition change: Ecosystems-Atmosphere interactions. *Atmospheric Environment*, 43(33), 5193-5267. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.068>
- [7] Muller y Mendelsohn, 2007. Nicholas Z. Muller, Robert Mendelsohn, Measuring the damages of air pollution in the United States, *Journal of Environmental Economics and Management* ( 54) 1, 1-14, <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2006.12.002>.
- [8] Hensher, 2007. Sustainable public transport systems: Moving towards a value for money and network-based approach and away from blind commitment, *Transport Policy*, (14), 1, 98-102, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.10.004>.
- [9] Bouf y Hensher, 2007. Dominique Bouf, David A. Hensher. The dark side of making transit irresistible: The example of France, *Transport Policy*, (14), 6, 523-532, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.09.002>.
- [10] Litman, Evaluating rail transit benefits: A comment, *Transport Policy*, (14),1, 94-97, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2006.09.003>.
- [11] Poudenx, 2008. The effect of transportation policies on energy consumption and greenhouse gas emission from urban passenger transportation, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, (42), 6, 901-909, <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.01.013>.
- [12] Ferretti et al, 2008 Integrating monitoring networks to obtain estimates of ground-level ozone concentrations A proof of concept in Tuscany (central Italy). *Science of The Total Environment*, 396(2-3),180-192. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.02.019>
- [13] Hollands, R. G (2008). Will the real smart city please stand up?. *City*. 12 (3): 303–320. <https://doi.org/10.1080/13604810802479126>
- [14] Ashton, That 'internet of things' thing, *RFID journal*, 2009 <https://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>, acceso 7/24/2019.
- [15] EMEP, 2016: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016 — European Environment Agency, EEA Reports, (21), <https://doi.org/10.2800/247535> , 2016.
- [16] Puliafito et al, 2017. Puliafito, S. Enrique; Allende, David G., Castesana, Paula S., Ruggeri, María F.: High-resolution atmospheric emission inventory of the Argentine energy sector. Comparison with Edgar global emission database. *Heliyon* 3 (2017) e00489. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00489> ISSN 2405-844
- [17] Puliafito et al, 2015. Puliafito, S.E., Allende, D., Pinto, S., Castesana, P.: High resolution inventory of

GHG emissions of the road transport sector in Argentina, *Atmospheric Environment* 101, 303-311. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.040>

[18] Puliafito et al, 2020. Puliafito, S. E., Bolaño-Ortiz, T. R., Berná Peña, L. L. and Pascual-Flores, R. M.: Dataset supporting the estimation and analysis of high spatial resolution inventories of atmospheric emissions from several sectors in Argentina, *Data in Brief*, 29, 105281, <https://doi.org/doi:10.1016/j.dib.2020.105281>

[19] Minem 2020: Secretaría de Energía de la Nación. Datos abiertos Minem: <http://datos.minem.gob.ar> (último acceso 27 December 2020).

[20] Cammesa, 2020. Compañía administradora del mercado mayorista eléctrico. <https://portalweb.cammesa.com/default.aspx>

[21] INDEC, 2020. Instituto de Estadística y Censo de Argentina. <https://www.indec.gob.ar/indec/web/Nivel4-Tema-2-24-85> (Acceso 15 December 2020).

[22] Skamarock et al., 2008. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research <http://www.buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/controlambiental/datos-diarios-de-monitoreo-de-calidad-de-aire>

[23] Grell et al, 2005. Grell G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKenn, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., and Eder, B. Fully Coupled "Online" Chemistry within the WRF Model, *Atmospheric Environment*, Vol. 39, pp. 6957–6975. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027>

[24] NCAR, NCEP, 2020. National Center for Atmospheric Research (NCAR), the National Oceanic and Atmospheric Administration (represented by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) Weather Research and Forecasting Model. <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model> último acceso 15/5/2021.

[25] Saha, et al, 2010. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015-1058. Retrieved May 15, 2021, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/91/8/2010bams3001>

[26] Puliafito et al, 2015. Puliafito, S.E., Allende, D.G, Mulena, C.G., Cremades, P., Lakkis, S.G.: Evaluation of the WRF Model Configuration for Zonda Wind Events in a Complex Terrain, *Atmospheric Research* 166, 24-32, 2015. ISSN 0169-8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.06.011>

[27] Mulena et al, 2012. Mulena, G., Allende, D., Puliafito, S.E., Lakkis, S., Cremades P., Ulke, A.: Examining the influence of meteorological simulations forced by different initial and boundary

conditions in volcanic ash dispersion modeling. *Atmospheric Research*, 176–177 (2016) 29–42, 2016. ISSN 0169-8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.009>

[28] Scire et al, 2000. Scire, J.S., Strimaitis, D.G. & Yamartino, R.J.. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. Earth Tech, Inc., Concord, Massachusetts. [http://www.src.com/CALPUFF/download/CALPUFF\\_UsersGuide.pdf](http://www.src.com/CALPUFF/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf)

[29] Gobierno de Buenos Aires, Agencia Ambiental. Estaciones de monitroee de calidad del aire. <http://www.buenosaires.gob.ar/agenciaambiental/controlambiental/datos-diarios-de-monitoreo-de-calidad-de-aire>

[30] OMS, 2005. Organización Mundial de la salud. Guías de calidad del aire. Actualización 2005. [http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO\\_SDE\\_PHE\\_OEH\\_06.02\\_spa.pdf;jsessionid=328E3607C3C2594C2B8509C8BE291FAF?sequence=1](http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=328E3607C3C2594C2B8509C8BE291FAF?sequence=1)