

ANÁLISIS CONJUNTO ENTRE FLUJO VEHICULAR Y CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE BUENOS AIRES (ARGENTINA)

Carolina Puccetti*, Candela Davaliña y Leonardo Serio

Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Recursos Naturales y Ambiente, Cátedra de Climatología y Fenología Agrícolas

* E-mail: puccetti@agro.uba.ar

Recibido: 11/04/2024
Aceptado: 22/11/2024

RESUMEN

La contaminación atmosférica es una problemática ambiental que se manifiesta principalmente en las grandes ciudades del mundo. En la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), la información al respecto no es abundante, a pesar de tener una gran densidad demográfica y un elevado tráfico vehicular. En este trabajo, se analizó la relación entre tráfico vehicular y contaminación en la CABA, utilizando dos conjuntos de datos del año 2019: (i) cantidad de autos que ingresan por hora y (ii) concentración de tres contaminantes atmosféricos (CO, NO₂ y material particulado o PM₁₀), registrados por sensores de tránsito en autopistas y por la Red de Monitoreo del Aire, respectivamente. Los resultados mostraron que los días hábiles (principalmente, el viernes) tanto el tráfico vehicular como la concentración de contaminantes presentan niveles diurnos más elevados que los fines de semana. Durante la noche y madrugada esta relación se invierte, ya que los valores más elevados se presentan los sábados y domingos. El análisis conjunto mostró una asociación entre ambas variables, acorde con la dinámica diaria de la ciudad. No obstante, si bien los perfiles horarios de cada variable presentaron un patrón similar, este no fue simultáneo: se observó un desfase horario desde el momento en que los contaminantes son emitidos en su fuente de origen hasta que alcanzan su mayor concentración en la atmósfera, que resultó de 2-3 h para el CO y NO₂, y de 4-5 h para el PM₁₀.

Palabras clave: calidad del aire, emisiones, gases, partículas, tránsito.

JOINT ANALYSIS BETWEEN VEHICULAR FLOW AND AIR POLLUTION IN THE CITY OF BUENOS AIRES (ARGENTINA)

ABSTRACT

Air pollution is an environmental problem that is mainly present in large cities around the world. In the City of Buenos Aires (CABA), there is not much information on this subject, despite having a high population density and high vehicular traffic. In this work, the relationship between vehicular traffic and pollution in CABA was analyzed, using two sets of data from 2019: (i) number of cars entering per hour, and (ii) concentration of three atmospheric pollutants (CO, NO₂ and particulate matter or PM₁₀), registered by highway traffic sensors and the Air Monitoring Network, respectively. The results showed that, on weekdays (mainly Friday), both vehicular traffic and the concentration of pollutants present higher daytime levels than on weekends. During night hours, this relationship is reversed, since the highest values occur on Saturdays and Sundays. The joint analysis showed an association between both variables, in line with the daily dynamics of the city. However, although the hourly profiles of each variable showed similar patterns, these were not simultaneous: there is a time lag from the moment the pollutants are emitted from their sources until they reach their highest concentration in the atmosphere, which resulted in 2-3 h for CO and NO₂, and 4-5 h for PM₁₀.

Key words: air quality, emissions, gases, particles, traffic.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es el proceso mediante el cual se introducen a la atmósfera sustancias que no forman parte de su composición natural o que naturalmente se encuentran en menores concentraciones. También se genera como resultado de determinadas combinaciones de estas sustancias o de su persistencia en la atmósfera por un tiempo más prolongado que lo normal. En general, resulta difícil de percibir cuando no se producen eventos de contaminación muy marcados, por lo que en muchas oportunidades esta problemática pasa desapercibida. Sin embargo, es uno de los problemas ambientales más significativos y extendidos a lo largo de todo el planeta (Velázquez de Castro, 2019), con nueve de cada diez personas en el mundo expuestas a sus efectos (Mosto *et al.*, 2024). Recurrentemente, suele ser resultado de políticas no sustentables en diferentes sectores: transporte, energía, gestión de residuos e industria (Accorinti *et al.*, 2023).

La contaminación atmosférica puede analizarse a partir de diferentes escalas, las cuales van desde la global, donde el ejemplo más claro es el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) y su efecto en el clima planetario, hasta la local, donde se ven afectadas áreas de extensión reducida (Ramathan y Feng, 2009; Molina y Gurjar, 2010; Baklanov *et al.*, 2016). A su vez, el nivel de gravedad generado por cada evento de contaminación depende de, al menos, tres factores: (i) las características propias de los contaminantes, como su toxicidad o el tiempo que permanecen en la atmósfera, llamado indistintamente tiempo de vida o de residencia (Wichers *et al.*, 2011; Harrison, 2018; Manisalidis *et al.*, 2020); (ii) el comportamiento de las variables meteorológicas de cada lugar, que determinan la capacidad de la atmósfera para dispersar dichos contaminantes (Elminir, 2005; Fisher *et al.*, 2006); y (iii) la geografía, ya que la contaminación puede ser mayor o menor según la ubicación geográfica (en los valles de una región montañosa, por ejemplo, suele ser más elevada que en zonas llanas o cerca de una costa). Por lo tanto, es posible afirmar que en este proceso repercuten factores tanto naturales como antropogénicos.

En áreas urbanas, la contaminación del aire cobra especial relevancia (Folberth *et al.*, 2015; Šarkan *et al.*, 2023). Esto es así ya que, a diferencia de las zonas rurales, las ciudades reúnen una serie de características que favorecen la ocurrencia de esta problemática: grandes niveles de construcción, elevada densidad poblacional,

presencia de actividades industriales –en general, localizadas en la periferia– y alto caudal vehicular (Gurjar *et al.*, 2008, Harrison *et al.*, 2021). Estas actividades urbanas emiten contaminantes al aire, los que bajo determinadas circunstancias pueden acumularse en la atmósfera y aumentar sus concentraciones, ya que su dilución, depósito y/o dispersión no son instantáneos. El aire así contaminado perjudica al ambiente en general y es respirado por las personas que allí habitan, provocando daños a la salud, tales como náuseas, dificultades respiratorias o irritación de la piel, cáncer, malformaciones en el nacimiento o afectación del sistema inmune (Curtis *et al.*, 2006; Kampa y Castanas, 2008; Donahue, 2018; Manisalidis *et al.*, 2020). Según Accorinti *et al.* (2023), en varias ciudades del mundo se ha demostrado una correlación positiva entre los días que presentan los niveles más altos de contaminación atmosférica y la cantidad de gente hospitalizada por problemas cardiorrespiratorios.

En los países subdesarrollados, como los de América Latina, durante las últimas décadas se produjo una rápida urbanización. A su vez, en estos sitios suelen evidenciarse retrasos tecnológicos en los motores de combustión y en los vehículos, que en promedio son más antiguos que los de los países desarrollados (D'Angiola *et al.*, 2010). Así, estos factores han causado niveles importantes de emisión de contaminantes, siendo el impacto ambiental especialmente severo en las denominadas megaciudades, es decir, aquellas que cuentan con más de 10 millones de habitantes (Gurjar *et al.*, 2008; Folberth *et al.*, 2015). Particularmente, el transporte automotor es la principal fuente de degradación de la calidad del aire urbano en muchas de ellas (Accorinti *et al.*, 2023); representando en los países subdesarrollados más del 50% de las emisiones totales (Andrés *et al.*, 2000).

Actualmente, la contaminación del aire en las áreas urbanas se debe a un número reducido de contaminantes de vida corta, como son el monóxido de carbono (CO), los óxidos de azufre (SO_x) y de nitrógeno (NO_x), los hidrocarburos y el material particulado (PM). Este último consiste en una mezcla heterogénea de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire, las cuales varían en tamaño y composición química, y se clasifican según su tamaño en: (i) partículas gruesas (PM₁₀) con un diámetro aerodinámico de hasta 10 µm y (ii) partículas finas (PM_{2,5}) con un diámetro aerodinámico menor a 2,5 µm (Kim *et al.*, 2015). Esta clasificación se realiza ya que el tamaño es una propiedad muy importante de

las partículas, debido a que está directamente relacionado con su capacidad de penetración en el sistema respiratorio: cuanto más pequeña es la partícula, más probabilidades tiene de ingresar a los órganos más profundos.

La Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) es la capital federal de Argentina. Se encuentra rodeada por 24 distritos que pertenecen al Gran Buenos Aires (GBA). Todos ellos, en conjunto, forman una gran metrópolis urbana conocida como el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), la tercera más grande de América Latina (Arkouli *et al.*, 2010). En particular, la CABA presenta una superficie de 203 km² y una población de 3,1 millones de habitantes, mientras que los 24 distritos del GBA cuentan con una población de 10,8 millones de habitantes (INDEC, 2023). Estas cuestiones demográficas no representan un dato menor para la calidad del aire, ya que los distritos y sus habitantes comparten la misma cuenca atmosférica (Abrutzky *et al.*, 2014).

Las características geográficas y atmosféricas de la CABA, tales como su ubicación costera frente al Río de La Plata, la llanura de su terreno y el pasaje de vientos a lo largo del año, favorecen la autodepuración de su aire y evitan la acumulación de grandes niveles de contaminación. Según Pineda Rojas *et al.* (2020), las concentraciones de PM₁₀ en CABA tienden a ser más altas cuando los vientos soplan con componente oeste o cuando su intensidad es débil, y disminuyen cuando lo hacen desde el río. Justamente, estos últimos vientos son los más recurrentes (Della Ceca *et al.*, 2017), siendo mayor su frecuencia en primavera y verano debido al desplazamiento estacional hacia el sur del anticiclón del océano Atlántico (Pineda Rojas *et al.*, 2020). Así, se puede decir que estas características le brindan un beneficio geográfico a la CABA, que no siempre sucede en otras megaciudades de la región (Abrutzky *et al.*, 2014), dado que le permiten presentar, en términos relativos, mejor calidad del aire.

Sin embargo, la CABA también presenta fuentes de contaminación. Por un lado, sobre la costa del Río de la Plata se ubican tres plantas eléctricas, caracterizadas como fuentes fijas, que generan un aporte importante de contaminantes al aire de la región (Abrutzky *et al.*, 2014). Por el otro, se presentan fuentes móviles, conformadas específicamente por el tráfico vehicular. Este suele ser en general elevado, especialmente en determinados horarios y en ciertos sectores de calles, avenidas o barrios (Allende *et al.*, 2012). Al mismo tiempo, al ser una ciudad central, la CABA presenta una

gran cantidad de actividades comerciales y de servicios. Estas generan, por un lado, un ingreso diario de aproximadamente tres millones de personas; por el otro, un flujo vehicular de un millón de automóviles en las principales vías de acceso y salida (Abrutzky *et al.*, 2014). Se estima que dentro de sus límites existe una flota vehicular compuesta por aproximadamente un millón de automóviles particulares, 40 mil taxis, 200 mil camiones de distintos portes y 15 mil colectivos (Fujiwara *et al.*, 2011); números que muy probablemente hayan aumentado hasta la actualidad. Esta flota representa cerca del 10% del total de automóviles del país (Accorinti *et al.*, 2023).

D'Angiola *et al.* (2010) realizaron un inventario de emisiones del tránsito automotor para el AMBA, aplicando factores de emisión en función de la categoría de vehículo (*i.e.* camión, colectivo, camioneta, automóvil particular o taxi), antigüedad y tipo de combustible (*i.e.* nafta, diésel o gas natural comprimido-GNC). Entre otras cosas, determinaron que el 65% de los vehículos utilizan naftas, siendo estos los responsables del 80% de las emisiones de CO. Por otro lado, los vehículos a diésel, que representan poco más del 20% del total, son responsables del 55% de las emisiones de NO_x y del 90% de PM₁₀.

Otro inventario, con menor nivel de desagregación en las fuentes móviles, pero que incluyó también a las fuentes fijas, fue realizado por Allende *et al.* (2012). Estos autores destacaron que los vehículos son responsables de casi la totalidad de las emisiones de CO y PM₁₀, así como del 62% de las emisiones de NO_x. Para este último contaminante, además, observaron una participación importante de la actividad industrial y de las centrales térmicas. Estos resultados coinciden con los de otros trabajos, en cuanto a que el tránsito vehicular conforma la mayor fuente de contaminación del aire, seguido luego por la actividad industrial (Bogo, 2004; Reich *et al.*, 2009; Arkouli *et al.*, 2010).

Durante las últimas cinco décadas, en la CABA se llevaron a cabo algunas campañas de medición de contaminantes del aire, ya sea a través de proyectos locales o internacionales, a partir de campañas puntuales de medición o a monitoreos continuos. Sin embargo, la gran mayoría de estas campañas fueron discontinuas. Por este motivo, la información disponible acerca de la problemática es escasa y fragmentada (Serio *et al.*, 2020). A partir del año 2009, el gobierno de la CABA comenzó a operar una Red de Monitoreo de Calidad del Aire bajo la órbita de su autoridad ambiental, la Agencia de

Protección Ambiental (APrA). Esta Red está conformada por tres estaciones automáticas de monitoreo, ubicadas en puntos urbanos estratégicos: en el barrio de La Boca, Parque Centenario y la intersección entre Avenida Córdoba y Rodríguez Peña. Estas estaciones miden de forma horaria las concentraciones de tres contaminantes del aire: CO, NO₂ y PM₁₀. Los datos de estas mediciones se corresponden con el promedio medido en la última hora, y los mismos se encuentran disponibles para cualquier usuario que requiera utilizarlos.

En el presente trabajo se abordó parte de la problemática de contaminación atmosférica en la CABA, analizando dos variables para el año 2019: (i) la concentración de contaminantes en el aire, a partir de datos registrados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire, y (ii) el flujo vehicular, a partir de datos registrados por radares. Se pretendió realizar una descripción de la dinámica de cada variable por separado y luego analizarlas en conjunto, para determinar si existe una relación entre ellas. De esta manera, se buscó contribuir a la caracterización e información disponible sobre esta problemática en la CABA, partiendo de la hipótesis de que en los días y horarios en que el flujo vehicular es más intenso, también lo son las concentraciones de contaminantes.

METODOLOGÍA

Para cumplir los objetivos propuestos, se utilizaron

dos bases de datos. Una de ellas estuvo conformada por datos horarios de ingresos vehiculares a la CABA, que se tomaron como representativos del flujo vehicular, registrados por radares ubicados en distintos puntos de las autopistas de la Ciudad. Tales datos son publicados en el sitio BA Data (GCABA, 2023). La otra base correspondió a datos horarios de concentración de contaminantes provenientes de la Red de Monitoreo de la CABA, solicitados previamente a la APrA a través del sistema de Acceso a la Información Pública (reglamentado por la Ley 104 de CABA) (Figura 1). Se tomó como período de análisis al año 2019, ya que este fue el último año con información completa y representativa de la situación normal para ambas variables. Cabe recordar que, durante los dos años siguientes, se produjo la pandemia de Covid-19, en la cual se vio disminuido el tránsito vehicular por las restricciones impuestas a la circulación. En consecuencia, la concentración de contaminantes del aire en CABA también decreció, sobre todo cuando las restricciones fueron más fuertes (Davalina, 2022).

Determinación del tráfico vehicular

Los datos de tráfico vehicular provinieron específicamente de los radares de las autopistas Teniente General Luis J. Dellepiane, 9 de Julio Sur y Lugones, arterias viales importantes y muy transitadas de ingreso a la CABA desde el sudoeste, sur y norte, respectivamente.

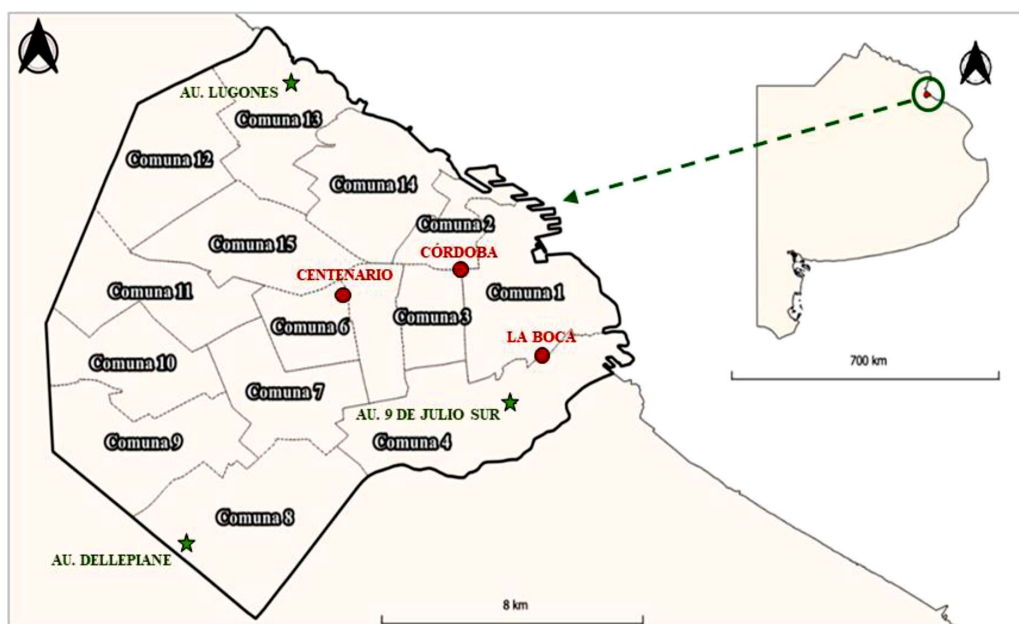


Figura 1. Ubicación de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire (símbolos rojos) de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA) y de los radares de tránsito utilizados en este trabajo (símbolos verdes).

Estos radares son los identificados con los códigos RD130 (Au. 9 de Julio Sur en el cruce con Av. Suárez, barrio de Barracas), RD100 (Au. Dellepiane y Montiel, Villa Lugano) y RD170 (Au. Lugones y Av. Udaondo, Núñez) (Figura 1), seleccionados en función de la cantidad y la calidad de su información. Es importante aclarar que no se utilizaron datos de radares ubicados en calles o avenidas internas, más cercanas a las estaciones de monitoreo, porque estos presentaban series muy discontinuas. Se realizó un análisis de consistencia para detectar valores faltantes y erróneos; y así la base quedó conformada por un 84%, 78% y 87% de registros disponibles en 9 de Julio, Dellepiane y Lugones, respectivamente.

Se calcularon promedios horarios de la cantidad de autos ingresantes a la CABA, con el fin de visualizar su variación a lo largo de las 24 h de cada día de la semana. Luego, se calcularon promedios diarios para cada día de la semana y para cada autopista, considerando el tráfico comprendido entre las 4 a.m. de un día y las 4 a.m. del día siguiente. Vale aclarar que, en este caso, el criterio adoptado se debió a que, antes de las 4 a.m., el flujo de tránsito pareció estar asociado al remanente de las actividades de la noche anterior, mientras que luego de esa hora pareciera corresponderse con el inicio de las actividades diurnas. También se calculó la relación porcentual de estos promedios diarios con respecto al promedio semanal.

Determinación de contaminantes en el aire

Los datos de concentración en el aire se analizaron para los tres contaminantes monitoreados por las estaciones automáticas (*i.e.* CO, NO₂ y PM₁₀). Aquí, la información disponible varió según la estación de monitoreo, siendo Córdoba y Centenario las que contaron con los registros más completos (entre 87% y 98% según el contaminante). Por su parte, los registros de la estación La Boca fueron, en general, un 10% menor que los de las anteriores.

Al igual que con los datos de tráfico vehicular, se realizaron promedios horarios para cada día de la semana, en cada una de las estaciones automáticas de monitoreo. En este caso, esto se hizo tanto de forma estacional (*i.e.* para el verano, otoño, invierno y primavera), como para el año completo. Así, se obtuvo para el 2019 y para cada estación del año la variación diaria de la concentración de cada contaminante en las tres estaciones. Esto permitió verificar los días en que los niveles de concentración fueron inferiores y superiores, y las horas en que ocurrieron los picos extremos.

Análisis conjunto de los datos

Para realizar el análisis conjunto de ambas variables, se tomaron los sets de datos originales (*i.e.* los que contenían los valores horarios registrados por los tres radares de tránsito y las tres estaciones automáticas de monitoreo) y se analizó el coeficiente de correlación entre cada conjunto de datos. Esto se hizo por autopista, en función de cada estación automática de monitoreo, aplicando un análisis de correlaciones cruzadas (Cryer y Chan, 2008). Para ello, se utilizaron diferentes desfases o "lags" entre las series temporales: primero, entre datos de tráfico vehicular y datos de contaminantes del mismo horario (lag 0); luego, entre datos vehiculares de una hora y datos de contaminantes de la hora siguiente (lag 1). Esta operación se repitió hasta llegar a un "lag" de 24 h. Así, dicho análisis permitió detectar cuál fue la mejor correlación entre la cantidad de autos que ingresaron por hora a la CABA y los valores de concentración de contaminantes en los distintos momentos del día.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tráfico vehicular

La variación horaria media de la cantidad de vehículos ingresantes a la CABA según día de la semana mostró, aunque con ciertas variaciones, patrones repetidos para las tres autopistas analizadas: (i) Au. 9 de Julio Sur, Barracas; (ii) Au. Dellepiane, Villa Lugano; y (iii) Au. Lugones, Núñez (Figura 1). En los días laborables (lunes a viernes), los ingresos durante las horas diurnas fueron mayores que los observados los sábados y domingos, patrón que se revirtió los días no laborables (Figura 2). En otras palabras, a partir de las 4 a.m. se observó un aumento progresivo de la cantidad de vehículos ingresantes en las tres autopistas, alcanzándose niveles muy superiores a los del fin de semana. Sin embargo, hacia las 5-6 p.m. esta relación se invirtió, lo que significa que durante las horas nocturnas (entre las 6 p.m. y las 4 a.m.) los mayores niveles de ingresos vehiculares ocurrieron durante el fin de semana. Estos patrones sugieren cómo sería la dinámica de la CABA cada día en particular, en relación con las actividades que se desarrollan en ella.

Por otro lado, entre las 6 y las 8 a.m. de los días hábiles se destacaron picos máximos de ingresos en cada una de las autopistas. La Au. Lugones es la que registró los mayores valores, con aprox. 9 mil vehículos h⁻¹, seguida de la Au. Dellepiane, con alrededor de 6 mil vehículos h⁻¹ y, en último lugar, la Au. 9 de Julio

Sur, con 5 mil vehículos h^{-1} . Si bien esta última presentó menor caudal, el pico máximo de las horas matutinas fue mucho más pronunciado que las otras autopistas (en relación con lo observado en las horas posteriores). Luego, hasta aproximadamente las 10 a.m., la cantidad de ingresos vehiculares disminuyó, en mayor o menor medida, en las tres vías de acceso. Allí se estabilizó hasta la mitad de la tarde y decreció desde las 5-6 p.m. hacia la noche. Esto concuerda con un patrón similar observado por Bogo *et al.* (1999), específicamente para un día laborable en una de las principales avenidas de acceso al centro de la ciudad. Asimismo, Allende *et al.* (2012) observaron que, durante los días laborables, suelen presentarse dos horas pico bien definidas: una por la mañana, entre las 8 y las 9 a.m., y otra por la tarde, entre las 7 y 9 p.m. La hora pico de la mañana coincide con lo descrito en el presente trabajo, mientras que la de la tarde no puede ser comparada ya que se infiere que la misma está generada por los egresos desde la CABA, que aquí no se analizaron.

También se observó una gran proximidad entre las curvas correspondientes a los días de semana, siendo similares los valores horarios promedio entre las 4 a.m. y las 6 p.m. para los distintos días laborables (Figura 2). Sin embargo, se destaca el día viernes, que presentó niveles levemente mayores a lo largo de todo el día; situación que fue más notoria hacia la noche. Esto sugiere que el patrón observado podría estar asociado a la ocurrencia de salidas de esparcimiento por el comienzo del fin de semana.

En cuanto a los sábados y domingos, se observó, por un lado, un mayor nivel de ingresos vehiculares en horas de la madrugada (respecto a los días hábiles), en línea con lo mencionado en el párrafo anterior: tanto en las noches de los viernes y sábados como en las madrugadas siguientes, los niveles de tráfico vehicular fueron mayores que en otros momentos del día, posiblemente debido a una mayor cantidad de salidas nocturnas. Sin embargo, durante las horas diurnas fue notoria la disminución de autos ingresantes hacia la CABA en las tres autopistas. Esto se produjo a partir de las 4 a.m., al contrario de los días laborables. Luego, para los sábados, se observó un aumento gradual de tráfico hasta las 8-9 a.m., pero fue menos pronunciado que los días laborables. Además, no se observó un pico máximo, sino un valor máximo que se mantuvo estable (alrededor de 3 mil vehículos h^{-1} en Au. 9 de Julio Sur, entre 4,5 y 5 mil vehículos h^{-1} en Au. Dellepiane y entre 5 y 5,5 mil vehículos h^{-1} en Au. Lugones) hasta

las 3 p.m. A partir de allí, este valor aumentó hasta las 8 p.m., principalmente en Au. Lugones (donde alcanza los 7 mil vehículos h^{-1}), y luego volvió a decrecer. Por otro lado, la madrugada del domingo fue la que tuvo el mayor flujo de ingreso vehicular en las tres autopistas, mientras que entre las 5 a.m. y las 3 p.m. fue el día con menor cantidad de ingresos. Sin embargo, hacia el final de la tarde y las primeras horas de la noche, se observó un nuevo pico de ingresos, lo cual sugiere que podría haber un regreso de los habitantes de la CABA, posiblemente luego de pasar el día o el fin de semana en localidades cercanas del GBA.

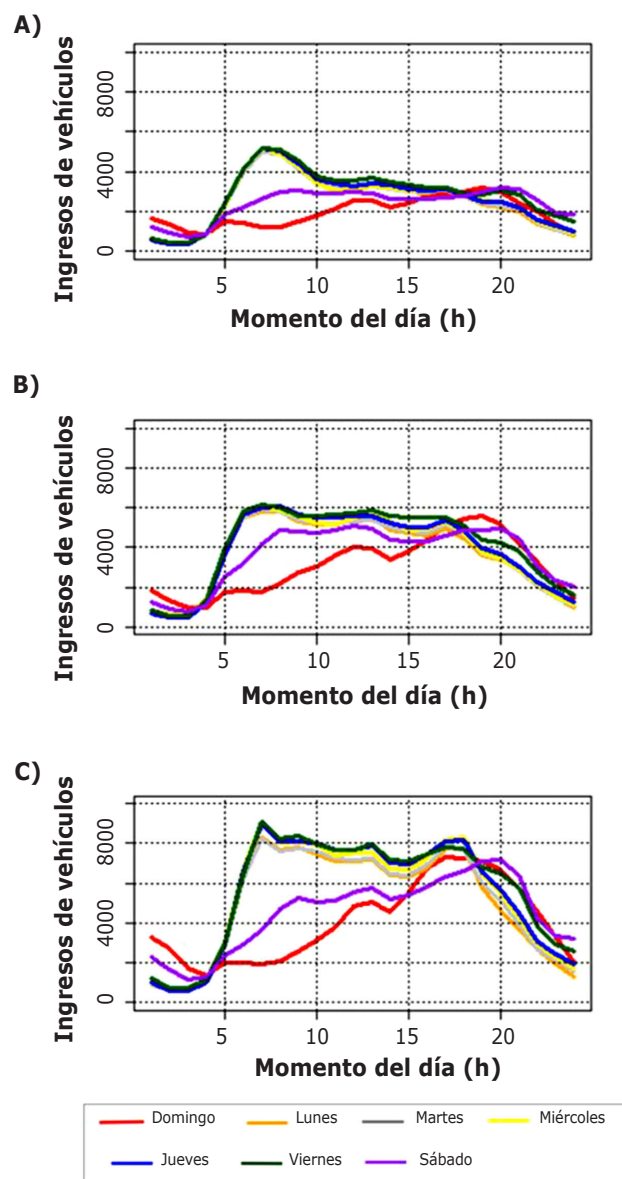


Figura 2. Ingreso medio de vehículos por hora para cada día de la semana en distintos accesos a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), según los radares ubicados en: (A) Au. 9 de Julio Sur (Barracas), (B) Au. Dellepiane (Villa Lugano) y (C) Au. Lugones (Núñez). Los datos se obtuvieron a partir de BA Data.

Con respecto a los promedios diarios calculados entre las 4 a.m. de un día y las 4 a.m. del siguiente, se observó (i) que fueron máximos los días viernes en las tres autopistas y (ii) que, para todos los días de la semana, el mayor valor se produjo en la Au. Lugones, seguido de Au. Dellepiane y, finalmente, la Au. 9 de Julio Sur (el mismo orden que el observado para los picos máximos matutinos) (Figura 3). Las diferencias en magnitud se pueden asociar a la cantidad de carriles en cada caso (cinco en Au. Lugones vs. tres en Au. Dellepiane y Au. 9 de Julio Sur) y a las posibles vías alternativas de ingreso existentes desde cada dirección. Esta situación es mejor descrita si se observa la variación porcentual del promedio de ingresos diarios con respecto al promedio semanal en cada autopista (Cuadro 1). El promedio de vehículos en circulación de los días viernes superó en un 15% a la media semanal, mientras que los domingos presentaron un 22% menos.

Contaminantes

La concentración de los contaminantes (*i.e.* CO, NO₂ y PM₁₀) analizados en las tres estaciones de monitoreo (La Boca, Córdoba y Centenario) presentaron algunos aspectos en común, pero también ciertas diferencias en relación con lo que sucede con los gases, por un lado, y con el material particulado, por el otro (Figura 4). Asimismo, se encontraron semejanzas entre las variaciones horarias de esta variable y las de tráfico vehicular. Se aclara que solo se presentan los resultados del año completo y no los estacionales, dado que estos últimos no mostraron diferencias significativas con los primeros.

Para los días laborables, las menores concentraciones de los tres contaminantes se observaron durante las horas de la madrugada, generándose un pico mínimo entre las 4 y las 6 a.m. A partir de allí, el CO y el NO₂ aumentaron rápidamente sus niveles hasta alrededor de las 8-9 a.m. y, luego, dependiendo el caso, disminuyeron o se

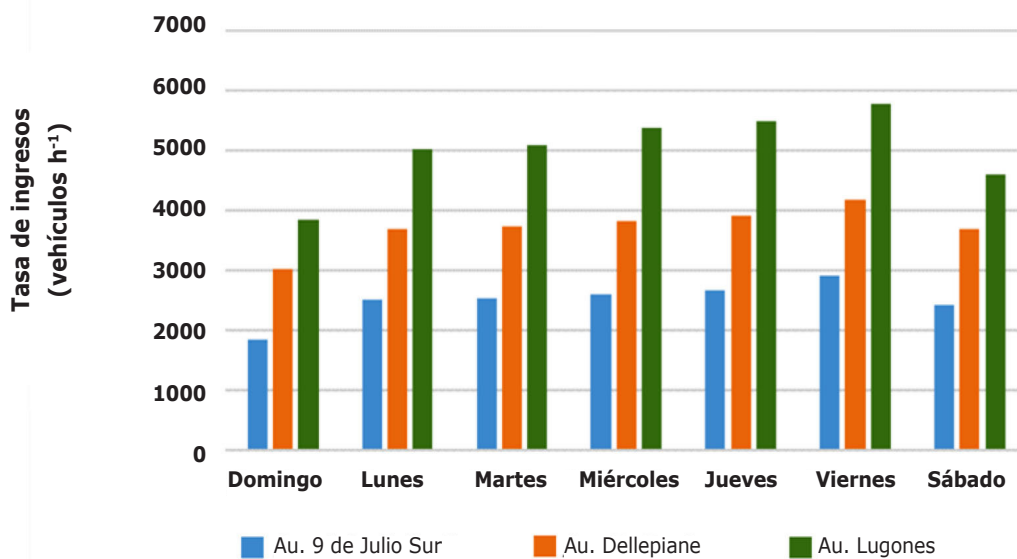


Figura 3. Tasa promedio de ingresos (vehículos h⁻¹) para cada día de la semana en distintos accesos a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), según los radares ubicados en: Au. 9 de Julio Sur (Barracas), Au. Dellepiane (Villa Lugano) y Au. Lugones (Núñez). Los datos se obtuvieron a partir de BA Data.

Cuadro 1. Relación porcentual de los ingresos diarios de vehículos respecto al promedio semanal en distintos accesos a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), según los radares ubicados en: Au. 9 de Julio Sur (Barracas), Au. Dellepiane (Villa Lugano) y Au. Lugones (Núñez). Los datos se obtuvieron a partir de BA DATA.

Autopista	Domingo	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
9 de Julio Sur	0,74	1,00	1,01	1,04	1,06	1,17	0,97
Dellepiane	0,81	0,99	1,00	1,03	1,05	1,13	0,99
Lugones	0,76	1,00	1,01	1,07	1,09	1,15	0,91
Promedio	0,78	1,00	1,01	1,03	1,06	1,15	0,98

mantuvieron relativamente estables hasta alrededor de las 3 p.m. Luego, aumentaron nuevamente, alcanzando un pico máximo entre las 8 y 10 p.m. Perfiles similares a esta situación fueron descritos también por Bogo (2004), quien analizó datos obtenidos en campañas de medición puntuales en diferentes sitios de la CABA. Este autor dejó en evidencia la existencia de una alta correlación entre las concentraciones de CO y NO_x , atribuyendo esto a la procedencia desde una fuente común para ambos: el tránsito vehicular.

Por su parte, el PM_{10} presentó una variación diferente según la estación de monitoreo (considerando también aquí solo los días hábiles). En La Boca, la concentración del contaminante aumentó a lo largo de todo el día, con

un pico máximo entre las 6 y 7 p.m. En Córdoba, aumentó hasta alrededor de las 10 a.m. y luego se mantuvo relativamente estable hasta las 8 p.m., cuando empezó a disminuir nuevamente. En Centenario, en cambio, se registró un pico máximo alrededor del mediodía, seguido de una leve disminución durante el resto del día. Con esto, se infiere que el PM_{10} presenta una variabilidad más alta en los lapsos cortos de tiempo respecto de los gases. Esto podría explicar también la irregularidad que presentan las curvas de variación horaria de las partículas (mucho mayor que las correspondientes a las del CO y NO_2). Además, a diferencia de los gases, no se detectaron picos máximos de concentración. Así, la dinámica del PM_{10} podría ser resultado de su

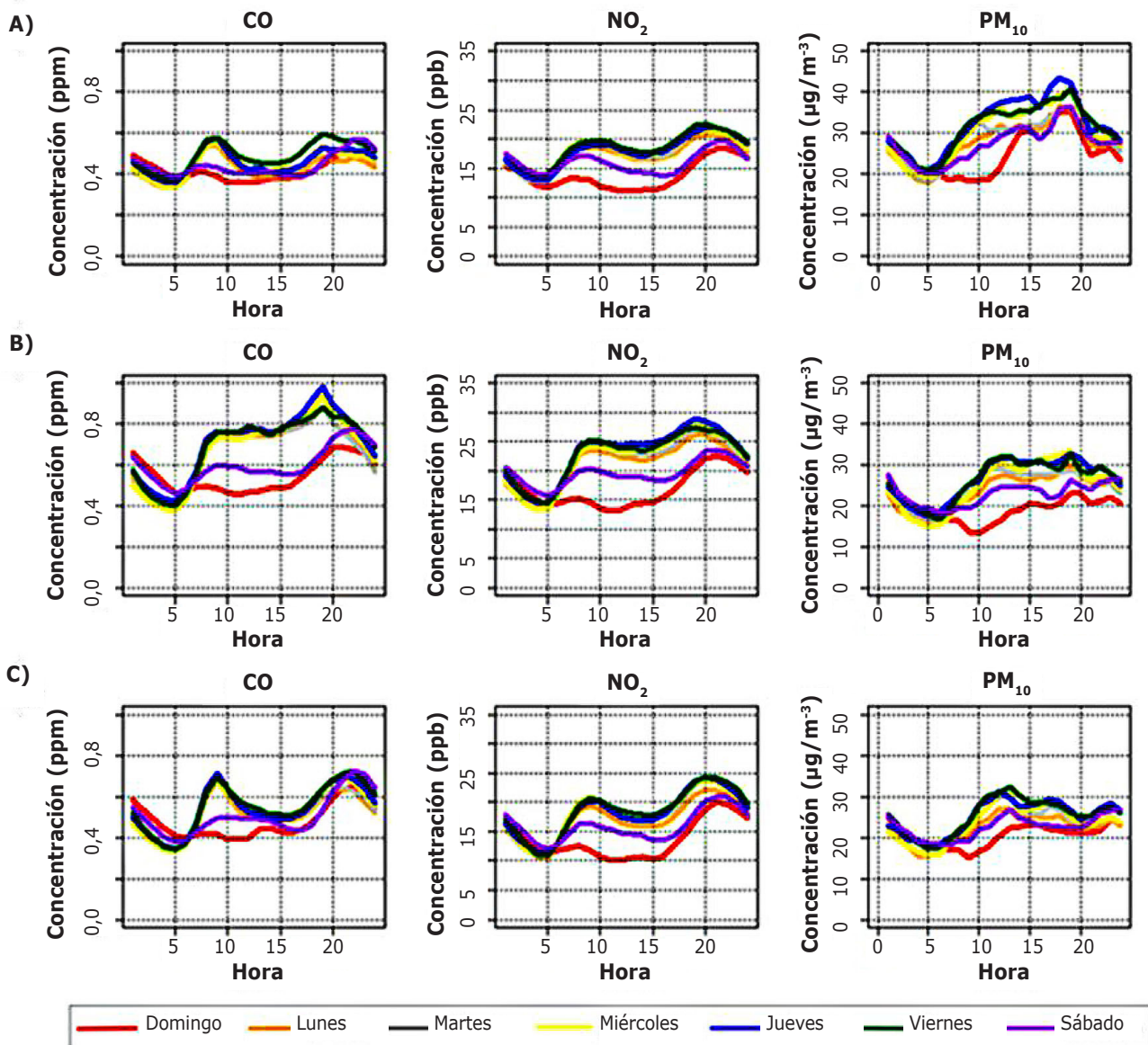


Figura 4. Concentración horaria promedio de contaminantes atmosféricos medidos en las estaciones La Boca (A), Córdoba (B) y Centenario (C): CO (ppm), NO_2 (ppb) y PM_{10} ($\mu\text{g m}^{-3}$). Los datos se obtuvieron a partir de APra.

tiempo de vida media y/o de su dilución en la atmósfera, lo que a su vez podría ser explicado por la variabilidad de la dirección e intensidad del viento. Es importante considerar que, además de las fuentes locales, suele haber una gran fracción de este contaminante que se origina en la resuspensión y el transporte advectivo desde zonas aledañas (Pineda Rojas *et al.*, 2020). Esto significa que, aparte de las generadas por el tránsito, puede haber partículas de origen natural (e.g. sales, polen, polvo, cenizas) u otros orígenes, como los incendios de pastizales en la zona del Delta del Paraná (Aversa, 2022). Dicha situación podría incorporar mayor irregularidad.

Finalmente, respecto a las variaciones horarias de los contaminantes, se observa que entre días de semana las diferencias en las concentraciones alcanzadas no fueron marcadas. Esto fue así para cada uno de los casos analizados, y se asemeja a lo descrito para el tráfico vehicular. Aquí también los días viernes presentaron los valores de concentración más altos, especialmente en horas de la tarde/noche. Por su parte, los sábados y domingos presentaron los niveles más bajos durante las horas diurnas. En cambio, durante la madrugada la relación se invirtió: en estas horas se observaron concentraciones más elevadas respecto a los días laborables.

Análisis conjunto de datos

Es sabido que existe una relación estrecha entre tráfico vehicular, emisiones y concentración de contaminantes a escala local, principalmente cuando las mediciones de todas las variables se hacen en un mismo sitio de monitoreo (Šarkan *et al.*, 2023). Sin embargo, es importante aclarar que el enfoque de este trabajo estuvo puesto en una escala espacial mayor, considerando a los valores puntuales registrados en cada estación de monitoreo como representativos de toda la ciudad (Mosto *et al.*, 2024). Por lo tanto, en esta parte del análisis no se realizó un estudio cuantitativo, sino que se utilizó la variable "ingreso de automóviles por hora a la CABA" como un proxy de la afluencia de tránsito hacia su interior. Al mismo tiempo, se tomó como supuesto el hecho de que los contaminantes emitidos pueden acumularse y transportarse en la atmósfera, impactando tanto en las cercanías de la fuente de emisión como también en regiones más lejanas (Allende *et al.*, 2012).

Los correlogramas realizados con los datos del tránsito en cada autopista y los valores de concentración de cada contaminante en las tres estaciones de monitoreo, mostraron mayor correlación entre las concentraciones

de NO_2 y CO y el flujo de vehículos ingresantes a CABA en la estación Córdoba, independientemente de la vía de ingreso (Figura 5). Cabe recordar que aquí se consideraron desfases horarios entre las series temporales desde 0 hasta 24 h. En segundo lugar, estuvo la estación Centenario y, por último, La Boca.

Por su parte, para el PM_{10} no se observaron grandes diferencias entre estaciones de monitoreo. Tales distinciones pueden ser explicadas por dos posibles razones: (i) las fuentes de emisión y/o (ii) las características de los sitios de muestreo. Para los gases, la mayor fuente de emisión dentro de las áreas urbanas son los vehículos, por lo que su concentración instantánea dependerá de la presencia de dichas fuentes y la circulación del aire en la microescala. A su vez, esta última se ve favorecida en las áreas más abiertas (e.g. Parque Centenario) y se dificulta en calles rodeadas de edificios altos (como Av. Córdoba). Por su parte, en La Boca, el hecho de que haya menores correlaciones entre contaminantes gaseosos y tránsito puede estar asociado a la cercanía a otras fuentes, en particular al polo petroquímico de Dock Sud. En el caso de las partículas, el aporte relativo de las emisiones vehiculares es menor que para los gases, ya que se suman también las fuentes naturales. Posiblemente por ello, la correlación con el tránsito vehicular fue más baja y su distribución espacial más homogénea.

En cuanto a los desfases o "lags" entre las series temporales, las mayores correlaciones entre ingresos y concentración de los gases se observaron en los lags 2 y 3, mientras que para las partículas se produjeron entre los lags 4 y 5. En otras palabras, para los gases, transcurrieron entre dos y tres horas desde que se produjo el pico máximo de ingresos vehiculares hasta que los contaminantes alcanzaron su máxima concentración en la atmósfera. Por su parte, el PM_{10} tardó entre cuatro y cinco horas.

Estas situaciones indican que hay un proceso acumulativo en el tiempo, desde el momento en que se producen las emisiones por los vehículos ingresantes a la CABA hasta que se concentran los contaminantes en la atmósfera. Como se mencionó anteriormente, dicha acumulación depende del tiempo de residencia de cada sustancia en ella. El CO , por ser menos denso que el aire, se eleva rápidamente hacia mayores alturas, mientras que el NO_2 se disocia en las reacciones fotoquímicas que dan lugar a la formación de ozono troposférico (Velázquez de Castro, 2019). En cambio, el PM_{10} puede ser resuspendido por los movimientos turbulentos del aire

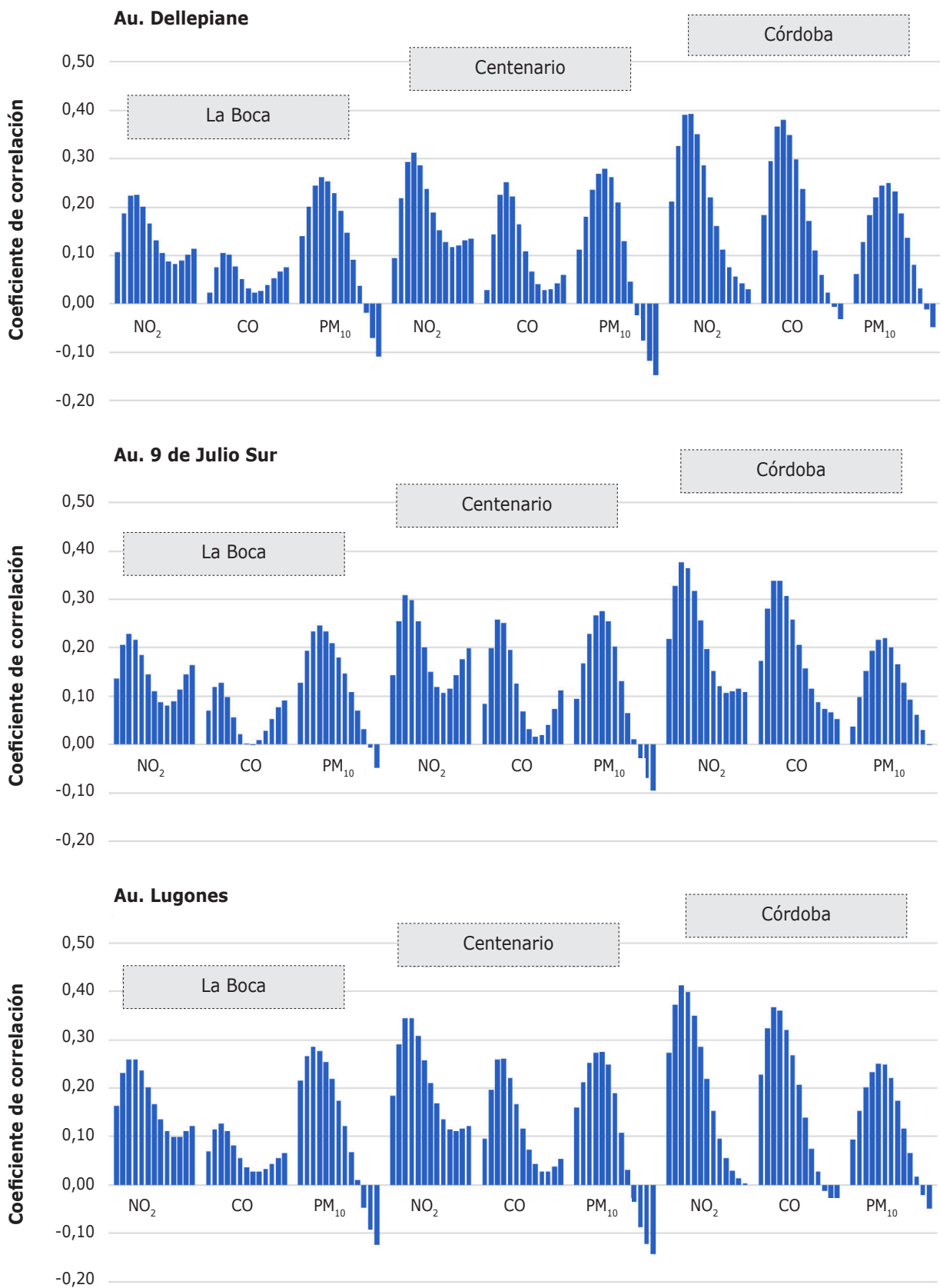


Figura 5. Correlogramas cruzados entre flujo vehicular en las autopistas y concentración de contaminantes en las estaciones de monitoreo en Au. 9 de Julio Sur (Barracas), Au. Dellepiane (Villa Lugano) y Au. Lugones (Núñez). La primera barra de cada grupo corresponde al lag 0 (series sin desfase temporal) y la última al lag 12 (desfase de 12 h de las series de concentraciones respecto a las de tránsito).

y, así, el proceso acumulativo puede extenderse por más tiempo. Esto puede explicar también el retraso que se observa en las curvas de variación diaria entre los picos de ingresos de automóviles (Figura 2) y aquellos correspondientes a los contaminantes (Figura 4). Al mismo tiempo, es importante tener en cuenta que las partículas no son emitidas exclusivamente por el tránsito vehicular. Bedregal *et al.* (2023) identificaron las fuentes de PM_{10} en un sitio urbano de Perú, determinando que solo el 31% proviene de los escapes de los vehículos, a los que debería sumarse otro 10% producido por el rozamiento de los neumáticos con el pavimento y de los sistemas de frenos. En CABA, algunas fuentes naturales juegan un rol importante, entre ellas la sal marina (Dos Santos *et al.*, 2012).

Otra cuestión para considerar en estos análisis es el efecto que presentan las condiciones meteorológicas en la dispersión de los contaminantes. Si bien esta variable escapa al objetivo de este trabajo, no es un aspecto menor en lo referido a la contaminación atmosférica. En este sentido, analizar la calidad del aire a partir de la dirección del viento puede ser una herramienta útil a la hora de evaluar el rol que cumplen las diferentes fuentes de emisión. En sintonía, Pineda Rojas *et al.* (2020) analizaron las variaciones horarias de los tres contaminantes registrados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de CABA, agrupando días que presentaron las mismas características del viento, y encontraron diferencias significativas en los niveles de la calidad del aire según dichos patrones de viento.

Más adelante, Mosto *et al.* (2024) utilizaron la clasificación de vientos hecha por Pineda *et al.* (2020) y analizaron, por un lado, las concentraciones anuales de los tres contaminantes; por el otro, la frecuencia diaria en la que ocurrían altas concentraciones de dichos contaminantes. Así, encontraron diferencias según la estación de monitoreo y el sector desde donde provenían los vientos: en Parque Centenario (estación Centenario, Figura 1), las mayores concentraciones para los tres contaminantes se dieron con vientos provenientes del norte y del noreste, así como con vientos categorizados de baja intensidad. Mientras tanto, las menores concentraciones se obtuvieron con vientos del sudeste. En la estación Córdoba, por su parte, encontraron situaciones similares, pero para el CO detectaron valores altos con vientos del sur y sudeste. Esto lo atribuyeron al llamado "efecto cañón" de las calles. En La Boca, las concentraciones más bajas ocurrieron con vientos provenientes del Río de La Plata y con vientos del sector sur-sudeste,

mientras que las más altas las obtuvieron con vientos del sector norte y noreste. Como puede verse en estos estudios, los factores meteorológicos (como es el viento en este caso) inciden directamente en los niveles de contaminación registrados. En este sentido, sería conveniente evaluar en próximas investigaciones cómo estas características inciden en los desfases encontrados entre los picos máximos de los ingresos vehiculares y la concentración de contaminantes.

CONCLUSIONES

El tráfico vehicular es la principal fuente de contaminantes del aire en los grandes conglomerados urbanos, sobre todo en los países en desarrollo. La CABA, si bien suele presentar buenas condiciones de calidad del aire, también cuenta con un elevado flujo vehicular, especialmente en algunas calles y avenidas y en determinados horarios. El presente estudio muestra la existencia de una relación entre la cantidad de autos que ingresan a la CABA y la concentración de tres contaminantes del aire (CO , NO_2 y PM_{10}): durante las horas diurnas de los días hábiles, tanto el tráfico vehicular como la concentración de los contaminantes atmosféricos presentan niveles mucho más elevados que los sábados y domingos. El viernes, en particular, es el día hábil que más se destaca en este sentido. En horas nocturnas, son los sábados y domingos los que presentan valores más elevados para ambas variables. Sin embargo, esta relación no consiste en una dinámica simultánea, ya que las máximas concentraciones ocurren con posterioridad al momento en que se generan las emisiones en su principal fuente de origen. Por lo tanto, la hipótesis planteada en el trabajo se cumple de forma parcial, ya que cuando aumenta el tránsito también lo hacen las concentraciones, pero existe un desfase temporal entre ambas variables. Al igual que lo reportado en trabajos previos sobre esta problemática en la CABA, es necesario considerar la incidencia de las condiciones meteorológicas sobre la posibilidad de que los contaminantes se dispersen rápidamente o se concentren en la capa límite de la atmósfera sobre la Ciudad. Este factor podría influir en el transporte de los contaminantes monitoreados (considerando que los sensores de tránsito aquí utilizados se encuentran a una cierta distancia de las estaciones de monitoreo), así como en los desfases horarios que se producen entre los picos máximos de flujo vehicular y los mayores niveles de contaminación. Por lo tanto, este aspecto queda pendiente para su abordaje en futuras investigaciones. Asimismo, sería interesante extender el

análisis a lo que ocurre con el egreso de vehículos, ya que, previo a su salida, estos vehículos circulan por el interior de la CABA y contribuyen a la emisión de contaminantes. Por último, cabe señalar que este tipo de estudios resultan necesarios para una buena gestión y planificación de la dinámica vehicular urbana y de la calidad del aire. En un contexto mundial donde existe una ten-

dencia creciente a la concentración de la población en ciudades (con el impacto ambiental que esto conlleva), se vuelve indispensable generar información que permita contribuir tanto a la toma de decisiones como a la implementación de acciones a mediano plazo para mejorar la calidad del aire, por ejemplo, mediante la formulación de políticas públicas, más eficaces y sustentables.

BIBLIOGRAFÍA

- Abrutzky, R., Dawidowski, L., Murgida, A. y Natenzon, C. (2014). Contaminación del aire en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires: el riesgo de hoy o el cambio climático futuro, una falsa opción. *Ciência & Saúde Coletiva*, 9, 3763-3773. <https://doi.org/10.1590/1413-81232014199.07472014>
- Accorinti, J., Allende, D. y Puliafito, S. E. (2023). The impact on air quality of PM₁₀ emissions from the bus fleet of Buenos Aires City. *SN Appl. Sci.*, 5, 6. <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05231-5>
- Allende, D., Puliafito, S., Fernández, R., Castro, F. y Cremades, P. (2012). Herramientas para la evaluación integral de la calidad del aire en Argentina: modelos de escala urbana y regional. *Proyecciones*, 10(1), 31-44.
- Andrés, D., Ferrero, E. y Mackler, C. (2000). Monitoreo de contaminantes del aire en la Ciudad de Rosario-Argentina. *Información Tecnológica*, 8, 11-20.
- 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. <https://doi.org/10.5094/APR.2010.001>
- Aversa, F. (2023). *Incendios de pastizales: su aporte a la contaminación atmosférica en Ciudad Autónoma de Buenos Aires* (tesis de grado). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Baklanov, A., Molina, L. y Gauss, M. (2016). Megacities, air quality, and climate. *Atmos. Environ.*, 126, 235-249. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.11.059>
- Bedregal, P., Ubillus, M., Cáceres-Rivero, C., Olivera, P., Garay, R., Rojas, J., Zafra, R. y Urnanivia, R. (2023). Determination of atmospheric aerosol components in an urban area to evaluate the air quality and identify the sources of contamination. *J. Radioan. Nucl. Chem.*, 332, 3507-3514. <http://doi.org/10.1007/s10967-023-08805-8>
- Bogo, H., Negri, R. M. y San Román, E. (1999). Continuous measurement of gaseous pollutants in Buenos Aires city. *Atmos. Environ.*, 33, 2587-2598.
- 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, Argentina. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3759_Bogo.pdf
- Curtis, L., Rea, W., Smith-Willis, P., Fenyves, E. y Pan, Y. (2006). Adverse health effects of outdoor air pollutants. *Environ. Int.*, 32, 815-830. <https://doi:10.1016/j.envint.2006.03.012>
- Cryer, J. y K. Chan (2008). *Time Series Analysis with Applications in R*. 2a ed. Springer.
- D'Angiola, A., Dawidowski, L., Gómez, D. y Osses, M. (2010). On-road traffic emissions in a megacity. *Atmos. Environ.*, 44, 483-493. <https://doi:10.1016/j.atmosenv.2009.11.004>
- Davalicña, C. (2022). *Las restricciones al flujo vehicular durante la pandemia del Covid-19 y su impacto sobre la calidad del aire en la Ciudad de Buenos Aires* (tesis de grado). Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Della Ceca, L., Micheletti, M. y Piacentini, R. (2017). Atmospheric particulate matter variability during 2014 at Buenos Aires City (Argentina) comparing ground-based measurements and satellite data. *Proceedings*, 1, 180. <https://doi:10.3390/ecas2017-04152>
- Donahue, N. (2018). Air pollution and Air quality. En: Török, B. y Dransfield, T. (Eds.). *Green chemistry. An inclusive approach* (pp. 151-176). Elsevier.
- Dos Santos, M., Dawidowski, L., Smichowski, P., Ulke, A. y Gómez, D. (2012). Factors controlling sea salt abundances in the urban atmosphere of a coastal South American megacity. *Atmos. Environ.*, 59, 483e491. <https://doi:10.1016/j.atmosenv.2012.05.019>
- Elminir, H. (2005). Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Sci. Tot. Environ.*, 350, 225-237. <https://doi:10.1016/j.scitotenv.2005.01.043>
- Fenger, J. (2009). Air pollution in the last 50 years – From local to global. *Atmos. Environ.*, 43, 13-22. <https://doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.061>
- Fisher, B., Kukkonen, J., Piringer, M., Rotach, M. y Schatzmann, M. (2006). Meteorology applied to urban air pollution problems: concepts from COST 715. *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 555-564. <https://doi.org/10.5194/acp-6-555-2006>
- Folberth, G., Butler, T., Collins, W. y Rumbold, S. (2015). Megacities and climate change - A brief review. *Environ. Pollution*, 203, 235-242. <https://doi:10.1016/j.envpol.2014.09.004>
- Fujiwara, F., Gómez, D., Dawidowski, L., Perelman, P. y Faggi, A. (2011). Metals associated with airborne particulate matter in road dust and tree bark collected in a megacity (Buenos Aires, Argentina). *Ecol. Indicators*, 11, 240-247. <https://doi:10.1016/j.ecolind.2010.04.007>
- Gurjar, B., Butler, T., Lawrence, M. y Lelieveld, J. (2008). Evaluation of emissions and air quality in megacities. *Atmos. Environ.*, 42, 1593-1606. <https://doi:10.1016/j.atmosenv.2007.10.048>

- Harrison, R. (2018). Urban atmospheric chemistry: a very special case for study. *NPJ Climate and Atmospheric Science*, 1, 20175. <https://doi.org/10.1038/s41612-017-0010-8>
- Harrison, R., Vu, T., Jafar, H. y Shi, Z. (2021). More mileage in reducing urban air pollution from road traffic. *Environ. Int.*, 149, 106329. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106329>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos-INDEC. (2023). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022: Resultados definitivos. Indicadores demográficos, por sexo y por edad*. https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/poblacion/censo2022_indicadores_demograficos.pdf
- Kampa, M. y Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environ. Pollution*, 151, 362-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A. y Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: A review. *Frontiers in Public Health*, 8, 14. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Molina, L. y Gurjar, B. (2010). Regional and global environmental issues of air pollution. En: Gurjar, B., Molina L. y Ojha, C. (Eds.). *Air pollution: health and environmental impacts* (pp. 493-518). Taylor & Francis.
- Molina, M. y Molina, L. (2004). Megacities and atmospheric pollution. *J. Air & Waste Manag. Assoc.*, 54, 644-680. <https://doi.org/10.1080/10473289.2004.10470936>
- Mosto, C., Pineda Rojas, A. y Rojas, N. (2024). Characterization and interannual variation of air quality in the city of Buenos Aires relative to the new WHO guidelines. *Meteorologica*, 49, e030. <http://doi.org/10.24215/1850468Xe030>
- Pineda Rojas, A., Borje, R., Mazzeo, N., Saurral, R., Matarazzo, B., Cordero, J. y Kropff, E. (2020). High PM₁₀ concentrations in the city of Buenos Aires and their relationship with meteorological conditions. *Atmos. Environ.*, 241, 117773. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117773>
- Ramanathan, V. y Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmos. Environ.*, 43, 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.063>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0428-x>
- Šarkan, B., Gnap, J., Loman, M. y Harantová, V. (2023). Examining the amount of particulate matter (PM) emissions in urban areas. *Appl. Sci.*, 13, 1845. <http://doi.org/10.3390/app13031845>
- Serio, L., Puccetti, C. y Oderigo, J. (2020). Revisión de los monitoreos de calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires. *Agronomía & Ambiente*, 40, 50-62.
- Velázquez de Castro, F. (2019). *Contaminación atmosférica. Conceptos, causas, efectos, control*. Acribia.
- Wichers, L., Brown, J., Stanek, J., Gift, J. y Costa, D. (2011). Air Pollution toxicology—A brief review of the role of the science in shaping the current understanding of air pollution health risks. *Toxicol. Sci.*, 120, S8-S27. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfq367>