

2022

CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN EL ENTORNO URBANO DE LLEIDA

Elaborado por

*Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua del
CSIC*



Para

Ajuntament de Lleida



Ajuntament de Lleida

- **ANTECEDENTES Y OBJETIVOS**
- **ESTRUCTURA DEL ESTUDIO**
- **METODOLOGÍA**
 - NO₂ y NH₃
 - PM_x, BC y UFP
- **RESULTADOS**
 - Concentraciones y patrón espacial y temporal de NO₂
 - Concentraciones y patrón espacial de NH₃
 - Concentraciones y patrón temporal de PM_x, BC y UFP en dos estaciones de muestreo seleccionadas
- **CONCLUSIONES**
- **BIBLIOGRAFÍA**

ANEXO

- **ANTECEDENTES Y OBJETIVOS**

La ciudad de Lleida cuenta con una estación oficial para el control de la calidad del aire clasificada como estación urbana de tráfico (Figura 1), ubicada en un entorno que se considera también representativo del diseño de la ciudad. Con anterioridad a la realización del presente estudio se llevaron a cabo mediciones puntuales en la ciudad con unidad móvil, que pueden consultarse en <https://urbanisme.paeria.cat/sostenibilitat/qualitat-ambiental>.

Los principales contaminantes de interés evaluados hasta la fecha en la ciudad son PM_{10} , $PM_{2.5}$ y NO_2 , aunque se evidencia también la necesidad de ampliar los datos disponibles para incluir contaminantes emergentes como las partículas ultrafinas (N-UFP) y el carbono negro (BC). Por otra parte, la ciudad de Lleida se encuentra ubicada en una zona con conocida actividad agrícola y ganadera en zonas circundantes que impacta en los niveles de NH_3 y $PM_{2.5}$. El NH_3 es un precursor muy importante de partículas atmosféricas finas ($PM_{2.5}$), que podrían impactar de forma significativa en las concentraciones de partículas finas en la ciudad. Por último, la meteorología de la zona de estudio se caracteriza por una elevada frecuencia de situaciones de inversión térmica y estancamiento atmosférico que dan lugar a episodios de contaminación.

En este contexto, mediante un acuerdo entre el Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC) y el Ajuntament de Lleida, se diseñó un estudio con los siguientes objetivos principales:

1. Evaluar en detalle las concentraciones y evolución temporal de los principales contaminantes atmosféricos (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , partículas ultrafinas (N-UFP) y carbono negro (BC)) y obtener información que pueda posteriormente ser utilizada para fomentar la concienciación ciudadana en cuanto a la calidad del aire en la ciudad.
2. Llevar a cabo una evaluación de las concentraciones de amoníaco (NH_3) a lo largo de la ciudad, con especial atención a su variabilidad espacial.
3. Conocer la variación de la contaminación en función de las condiciones meteorológicas en relación a las situaciones de inversión térmica y su impacto sobre la generación de episodios de contaminación.
4. Evaluar la representatividad de la ubicación de la estación de medida de referencia, donde el valor límite diario de PM_{10} ($50 \mu g m^{-3}$) es frecuentemente superado. A modo de ejemplo, a lo largo de 2021 se dieron un total de 25 superaciones (Figura 2).

Para facilitar la interpretación de las fuentes de emisión que contribuyen a estas superaciones del límite diario se planteó la ampliación del estudio y analizar la composición química de las partículas. El análisis químico de las muestras recogidas durante días de superación seleccionados se llevará a cabo en estudios posteriores.

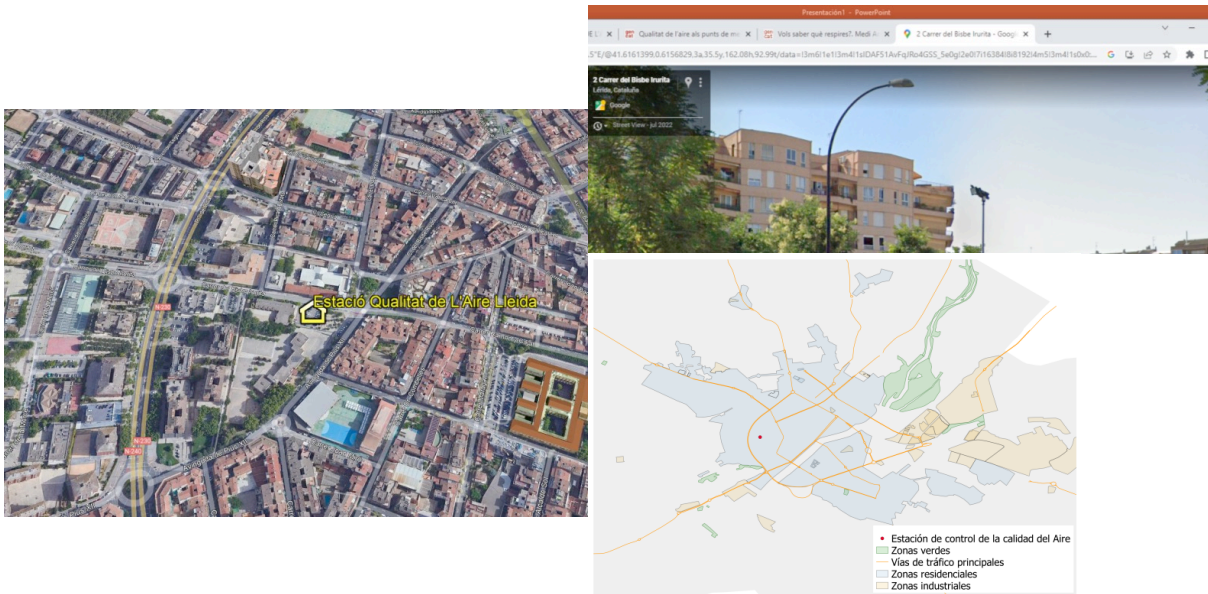


Figura 1. Ubicación de la estación oficial para el control de la calidad del aire en la ciudad de Lleida.

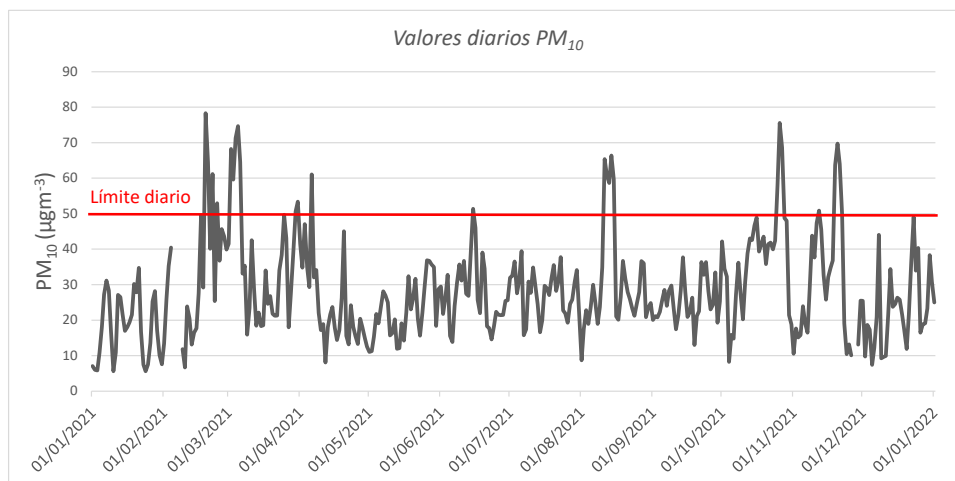


Figura 2. Valores diarios de PM_{10} en la estación de Lleida a lo largo del año 2021.

• ESTRUCTURA DEL ESTUDIO Y METODOLOGÍA

Para obtener una amplia caracterización de la calidad del aire en la ciudad se realizaron dos muestreos en dos periodos meteorológicamente diferenciados (23/02/2022-04/03/2022 y 27/06/2022-11/07/2022). Los muestreos en ambos periodos del año siguieron la misma metodología, basada en la combinación de muestreos pasivos y monitorización de datos en tiempo real:

1. Muestreos pasivos: con respecto a las concentraciones de NO_2 y NH_3 , se utilizó dosimetría pasiva con periodos de integración de 7 días, con tal de realizar un mapa urbano con una amplia resolución espacial, que permitiese detectar puntos de contaminación especialmente vulnerables (Figura 3).

2. Monitorización en tiempo real: con respecto a las concentraciones de partículas en suspensión (PM_x, UFP y BC), se instalaron monitores en tiempo real en dos estaciones fijas (Figura 3), que reportaron datos con una resolución de 5 minutos. Esto permitiría estudiar con detalle la evolución temporal, su relación con parámetros meteorológicos, así como realizar comparaciones con las concentraciones de PM₁₀ reportadas en la estación de control oficial de la ciudad.

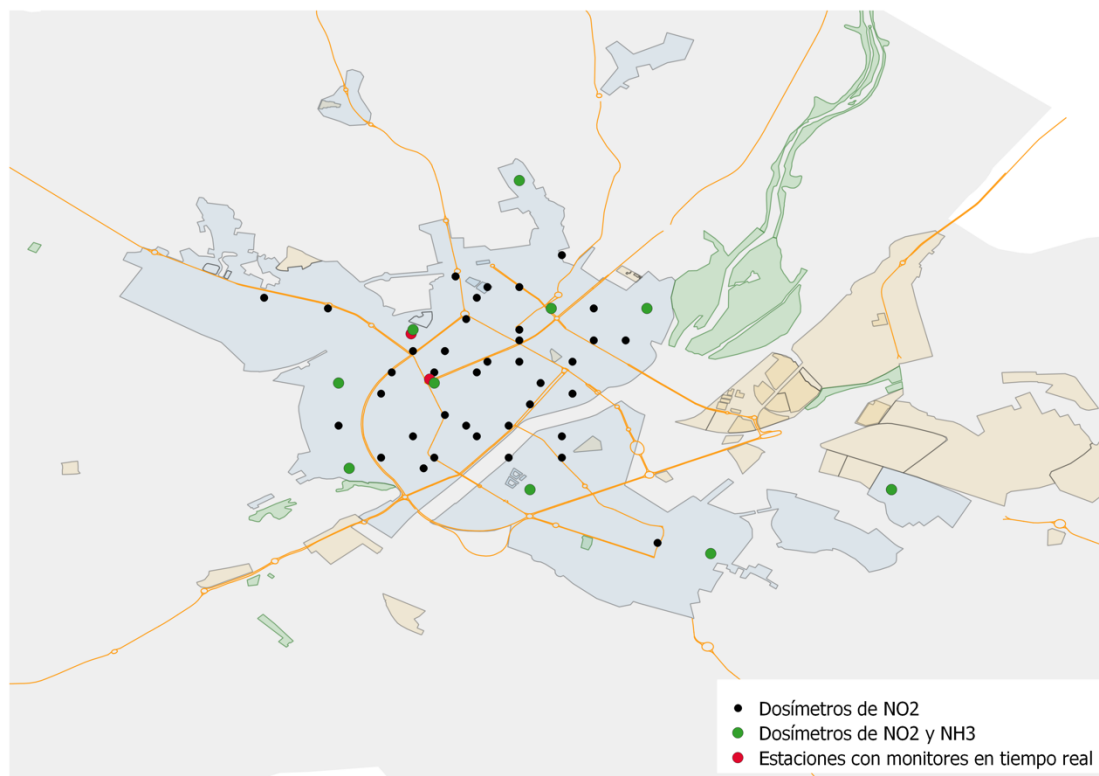


Figura 3. Ubicación de los puntos de muestreo establecidos para este estudio.

NO₂

Se instalaron 52 dosímetros Gradko durante cada muestreo. En cada periodo de estudio se realizaron dos muestreos de 7 días, obteniendo dos promedios integrados de concentración de NO₂ para cada periodo. Estos dosímetros son tubos de difusión de unos 7 cm que contienen en la parte superior un filtro impregnado con tri-etanol-amina (TEA) que absorbe químicamente el NO₂. En cada muestreo se colocaron réplicas en tres emplazamientos para evaluar la reproducibilidad del análisis; también se colocaron dosímetros en la estación de control oficial para validar las concentraciones en comparación con las reportadas por un monitor de NO₂ de referencia allí ubicado. Se han utilizado dos dosímetros por campaña como blancos. Tras la exposición, los dosímetros se retiraron y se trasladaron al laboratorio donde se realizó una extracción acuosa del nitrato del filtro de cada dosímetro y se determinó su concentración por espectrofotometría.

NH₃

Se instalaron 15 dosímetros ALPHA durante el muestreo del periodo de invierno y 11 durante el muestreo de verano. En cada periodo de estudio se realizó un muestreo de 7

días, obteniendo un promedio integrado de concentración de NH_3 para cada periodo. Estos dosímetros están hechos de un tubo de polietileno en el que se coloca un filtro en uno de los extremos; este filtro está impregnado de una solución de ácido fosforoso en metanol, que captura el amonio. En cada muestreo se utilizaron dos dosímetros como blancos. Después de la exposición, estos filtros fueron analizados mediante electrodo selectivo. Cabe destacar que no existe un método de referencia para realizar medidas de NH_3 .

Parámetros en tiempo real (PM_x, UFP, BC)

Para la monitorización de PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, BC y UFP en tiempo real se seleccionaron dos emplazamientos (Figura 3):

1. Agència de Salut Pública de Catalunya (ASPCAT): Av. Alcalde Roure, 2. Se trata de una ubicación cercana a vías principales de tráfico.
2. Hospital Universitario de Santa Maria: Av. Alcalde Roure, 44. Se trata de una ubicación que puede ser considerada representativa del fondo urbano.

En cada ubicación se instalaron tres instrumentos para la medida en tiempo real de:

-Concentración de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ con resolución 5-minutal mediante un contador óptico DustTrak TSI. Se trata de un equipo que no es de referencia, con ciertas limitaciones técnicas que están descritas en Rivas et al. (2017). Estas limitaciones afectan especialmente a la distribución de tamaños de partícula, es decir a la distinción entre PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{1} .

-Concentración de BC con resolución 5-minutal mediante un micro etalómetro portátil (AE51 microAeth®).

-Concentración de número de partículas (N-UFP, en el rango 10-700 nm) con resolución 10-minutal mediante un equipo DiscMini – Testo Aerosol.

Para asegurar la comparabilidad de los instrumentos utilizados, se han llevado a cabo ensayos de intercomparación previos y posteriores a cada muestreo y se han corregido las concentraciones obtenidas según los factores obtenidos.

Para investigar las áreas de procedencia de la contaminación se han utilizado datos meteorológicos obtenidos en la estación de Meteocat de la Femosa (<https://www.meteo.cat/observacions/xema/dades?codi=YJ>).

A estas medidas hay que añadir las recogidas de forma continua en la estación de control oficial de la Generalitat de Catalunya (https://mediambient.gencat.cat/ca/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_lair_e/vols-saber-que-respires/visor-de-dades/), que también son evaluadas en conjunto en este informe.

• RESULTADOS

Concentraciones y patrón espacial y temporal de NO_2

La Figura 4 muestra los mapas de las concentraciones de NO_2 reportadas por las medidas con dosimetría pasiva para los dos periodos de muestreo seleccionados. Las

concentraciones medias obtenidas para ambos periodos de 7 días durante el muestreo de invierno fueron de $33 \mu\text{g m}^{-3}$ (rango intercuartil ó IQR: $26\text{-}40 \mu\text{g m}^{-3}$), mientras que en verano fueron de $26 \mu\text{g m}^{-3}$ (IQR: $17\text{-}36 \mu\text{g m}^{-3}$). **Las menores concentraciones durante el verano se deben probablemente a unas condiciones meteorológicas que favorecieron la dispersión (menor estancamiento con mayor velocidad del viento, como se describirá posteriormente),** posiblemente unido además a un cambio en las pautas de movilidad ciudadana durante esas fechas. Se distingue el mismo patrón espacial en todos los muestreos, **con las concentraciones más elevadas próximas a las principales vías de tráfico (Figura 5), registrándose las más bajas en la zona del centro histórico de la ciudad.**

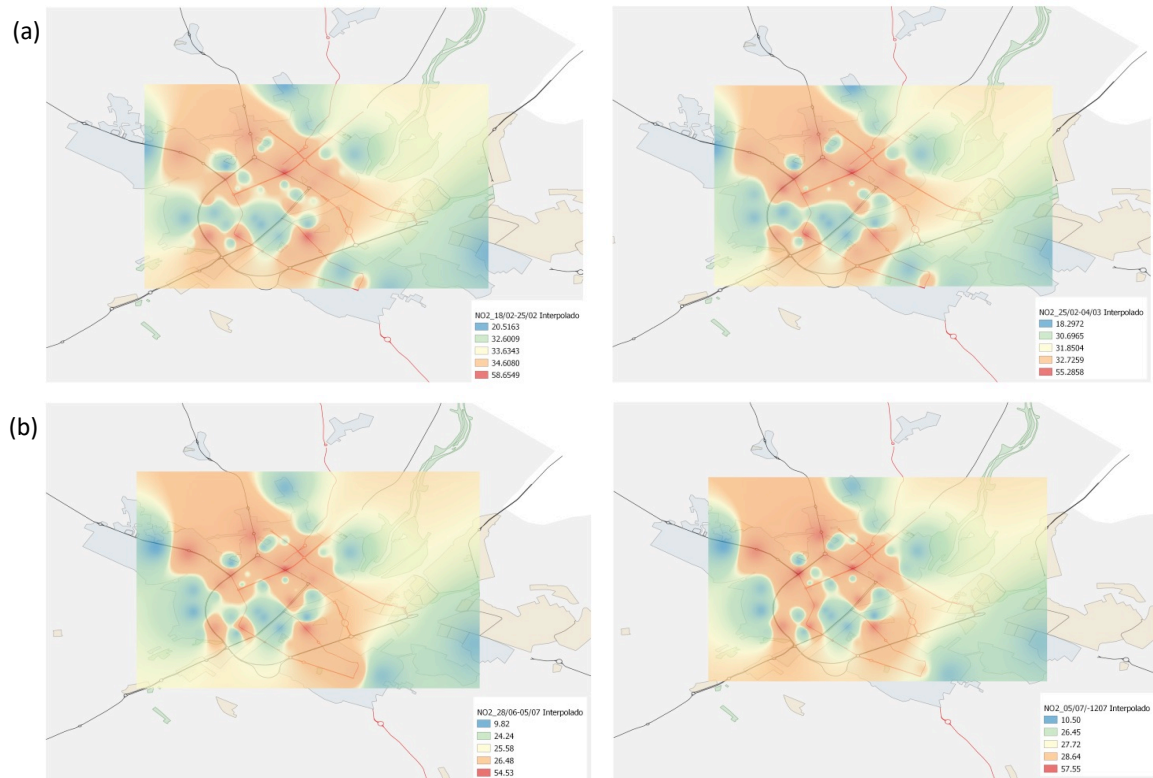


Figura 4. Mapas interpolados de las concentraciones semanales de NO_2 medidas a través de dosímetros pasivos durante este estudio para los periodos de invierno y verano y para las dos campañas realizadas en cada periodo: (a) 23/02/2022-04/03/2022, (b) 27/06/2022-11/07/2022.

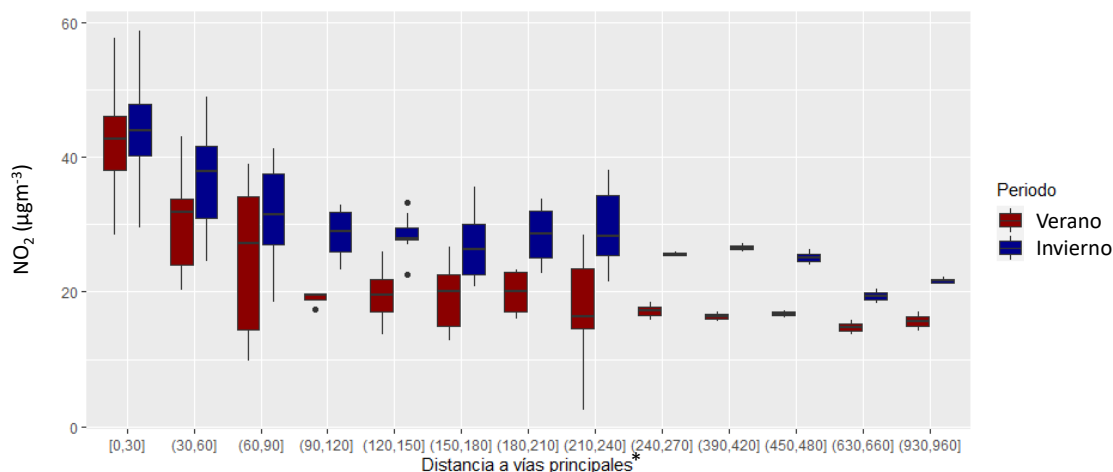


Figura 5. Diagrama de caja de las concentraciones de NO₂ según la distancia de los puntos de muestreo a las vías de tráfico primarias y secundarias de la ciudad para los dos periodos de estudio considerados. *Distancia mínima.

La Figura 6 muestra el ciclo diario de concentraciones en tiempo real de NO₂ para los dos periodos de estudio, según lo reportado por el monitor de referencia ubicado en la estación de control oficial. **Se aprecia un ciclo coincidente con las horas de máximo tráfico vehicular (8-10h) y de máximo estancamiento atmosférico por la tarde/noche,** con máximos de 22:00 a 01:00 h que probablemente proceden de la acumulación de contaminantes, debido a la reducción del espesor de la capa de mezcla. De nuevo se observan mayores concentraciones durante el periodo de invierno, con un promedio de 20 µgm⁻³, comparado con 8 µgm⁻³ de media durante el periodo de verano en la estación de control. Estas concentraciones promedio pueden considerarse en el límite inferior del rango típico para entornos urbanos; de hecho el límite legal horario actual no se superó en ninguna ocasión durante el año 2021, aunque sí las concentraciones recomendadas por la OMS. Con estos mismos datos en continuo se ha realizado un diagrama polar para NO₂ para cada periodo de estudio (Figura 7) con tal de evaluar el sector de origen de las concentraciones más elevadas, así como las diferencias entre periodos. En verano las velocidades de viento fueron más elevadas (Figura A1), especialmente desde el sector suroeste, mientras que el sector con las máximas velocidades durante el invierno fue el noreste. En ambos periodos, los diagramas polares indican que las máximas concentraciones de NO₂ tuvieron su origen en la dirección noreste, teniendo una componente este muy marcada durante el invierno, coincidiendo con la localización de vías principales de tráfico. Así, la Figura 7 nos indicaría que la estación estaría representando zonas con bajas concentraciones de NO₂, existiendo otras zonas más susceptibles en la ciudad, ya que bajo condiciones de calma, la concentraciones observadas son relativamente bajas.

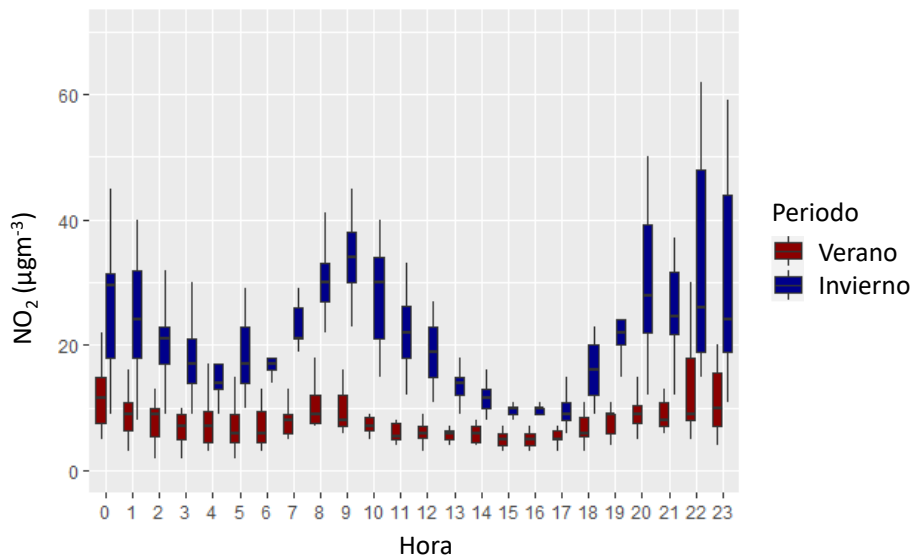


Figura 6. Diagrama de caja de las concentraciones de NO₂ en la estación de control oficial para las diferentes horas del día y para cada periodo de estudio.

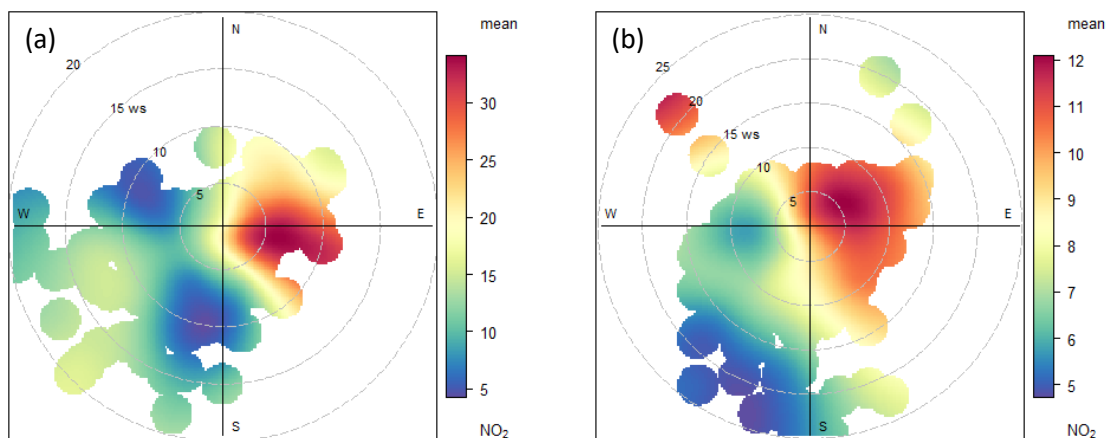


Figura 7. Diagrama polar de las concentraciones de NO₂ en la estación oficial de control durante los dos periodos de estudio: (a) invierno, (b) verano.

Concentraciones y patrón espacial de NH₃

La Figura 8 muestra los mapas de las concentraciones de NH₃ medidas mediante dosimetría pasiva durante las dos campañas de muestreo. No se observa ningún patrón espacial evidente que pudiera indicar dependencia de fuentes locales, como por ejemplo la proximidad al tráfico. Por el contrario, **las concentraciones muestran cierta homogeneidad en toda la extensión de la ciudad, lo que sugiere la influencia de fuentes de origen regional, probablemente fuentes agrícolas/ganaderas** relativamente cercanas a la ciudad. Las concentraciones, con un promedio de 22 μgm⁻³ en invierno y de 16 μgm⁻³ en verano, pueden considerarse elevadas para una ubicación de tráfico en

comparación con otras zonas europeas ($<3 \mu\text{g}\text{m}^{-3}$; Reche et al., 2015), aunque son inferiores a las registradas en otras zonas de fondo suburbano ($33 \mu\text{g}\text{m}^{-3}$; Generalitat de Catalunya, 2022). **En cualquier caso, estas concentraciones podrían tener importantes implicaciones en cuanto a la generación de partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$) secundarias en la ciudad de Lleida**, ya que se trata de uno de los principales gases precursores de partículas. La caracterización química de muestras de PM_{10} permitiría conocer el porcentaje en el que las partículas secundarias contribuyen a la masa total de partículas en aire en este entorno.

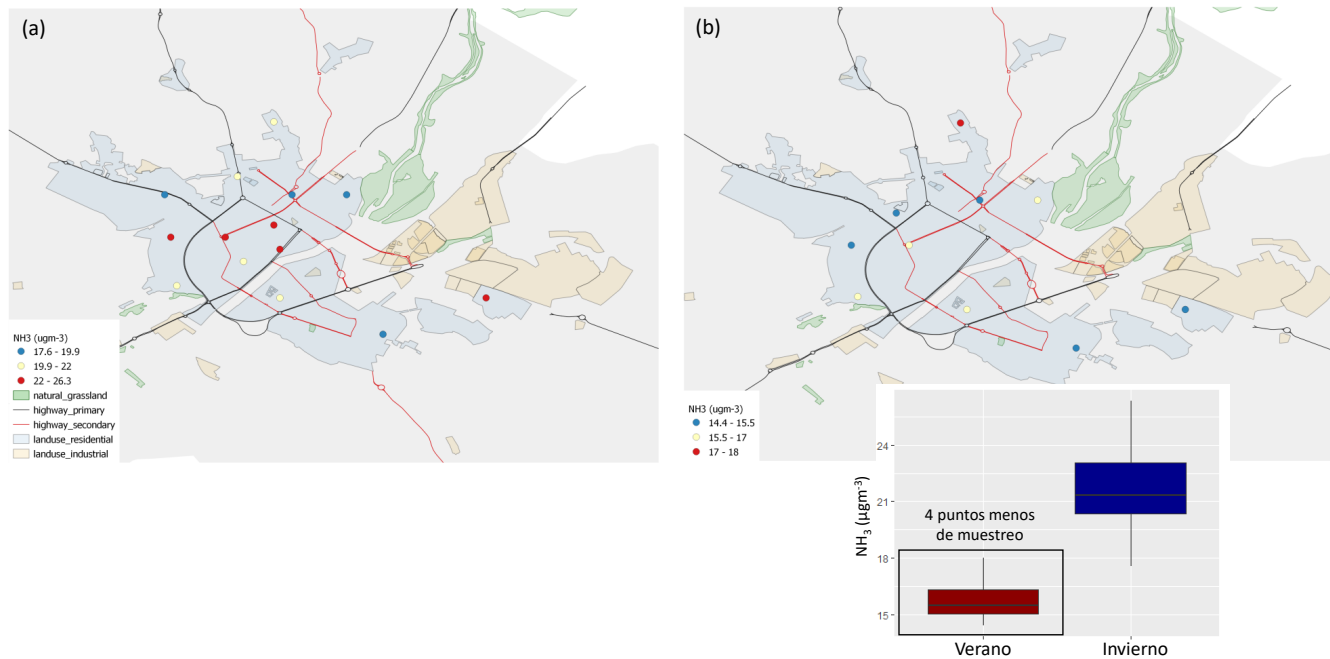


Figura 8. Mapas de las concentraciones de NH_3 medidas a través de dosímetros pasivos durante este estudio para los periodos de invierno y verano: (a) 23/02/2022-04/03/2022, (b) 27/06/2022-11/07/2022. Los diagramas de cajas muestran la diferencia de concentraciones entre los dos muestreos.

Concentraciones y patrón temporal de BC, N-UFP y PM_x en dos estaciones de muestreo seleccionadas

La Tabla 1 recoge las concentraciones medias de carbono negro (BC, expresadas en ngBC/m^3) y partículas ultrafinas (N-UFP, expresadas como número de partículas por cm^3 de aire) medidas en las estaciones de ASPCAT y de Hospital Santa María. Tanto en el periodo de invierno como de verano, se observa que las concentraciones fueron más elevadas en la estación de ASPCAT, lo que podría tener su origen en la **mayor proximidad al tráfico**. Las concentraciones fueron significativamente más elevadas en invierno, tanto en la estación clasificada de tráfico ($2549 \text{ ng}/\text{m}^3$ de BC y $20272/\text{cm}^3$ de N-UFP), como en la de fondo ($1499 \text{ ng}/\text{m}^3$ de BC y $11947/\text{cm}^3$ de N-UFP), considerándose elevadas, quedando las relativas a N-UFP por encima de lo recomendado por la OMS ($<10000/\text{cm}^3$). Las concentraciones medias en la estación de fondo durante el invierno

son muy similares a las reportadas típicamente en ubicaciones de fondo urbano. Sin embargo, las concentraciones en verano en la estación de fondo serían más típicas de un fondo suburbano (493 ng/m^3 de BC y $7464/\text{cm}^3$ de N-UFP). Como se ha comentado anteriormente, **este patrón está probablemente relacionado con unas mejores condiciones de dispersión**, además de a posibles reducciones en la movilidad en la ciudad durante el mes de julio.

La Figura 9 muestra los ciclos diarios de BC y N-UFP para los muestreos de invierno y verano. Se observan importantes diferencias entre los dos periodos, con ciclos más marcados en invierno, con **aumentos significativos durante las horas punta de tráfico y durante los periodos de menor dispersión atmosférica, tanto en las concentraciones de BC como de N-UFP**. Durante el verano el ciclo de BC se aprecia más suavizado, con concentraciones que aumentan durante las horas de máximo tráfico típicas de la mañana y de la tarde, pero que también se mantienen elevadas a mediodía, cuando la velocidad del viento tiene sus valores mínimos (Figura A1). Por otro lado, en el caso de N-UFP, las mayores concentraciones en verano se registran a mediodía, además de por efecto del factor anteriormente nombrado, **probablemente por la generación de partículas ultrafinas de origen secundario por fenómenos de nucleación, asociados a una alta temperatura y radiación solar en esta época** (Rivas et al., 2020).

La Figura 10 muestra los diagramas polares para BC y N-UFP para las dos estaciones temporales seleccionadas y para los dos periodos de estudio. Durante el invierno las tendencias son muy similares, con las concentraciones más elevadas procedentes del sector sureste, aunque algo más desplazado al centro en el caso de N-UFP. En verano, por el contrario, se observan diferencias más marcadas entre ambos parámetros. Mientras las concentraciones más altas de BC no muestran una dirección clara predominante, las concentraciones de N-UFP tuvieron sus máximos en la dirección oeste. Estas diferencias pueden deberse a la fuente adicional de N-UFP que encontramos durante el verano, con máximos a mediodía. Además, los datos meteorológicos indican diferencias claras en la dirección del viento de 2:00 a 10:00 h entre el periodo de invierno y de verano (Figura A2).

Tabla 1. Concentraciones medias de carbono negro (BC; ng/m³) y partículas ultrafinas (N-UFP; #/cm³, que indica el número de partículas por cm³ de aire) determinadas en las estaciones de ASPCAT y de Hospital de Santa María durante las campañas de invierno y verano, así como el promedio entre ambas.

		<i>ASPCAT</i>			<i>Hospital Santa María</i>		
		Promedio	Percentil 75	Percentil 25	Promedio	Percentil 75	Percentil 25
<i>Verano</i>	BC (ng/m ³)	1325	1625	587	493	674	255
	N-UFP (/cm ³)	12350	15842	6324	7464	8888	3554
<i>Invierno</i>	BC (ng/m ³)	2549	3154	1184	1499	1810	839
	N-UFP (/cm ³)	20272	23669	13094	11947	13874	9245
<i>Promedio</i>	BC (ng/m ³)	1809	2264	724	926	1201	387
	N-UFP (/cm ³)	19261	22936	12256	11321	13617	8723

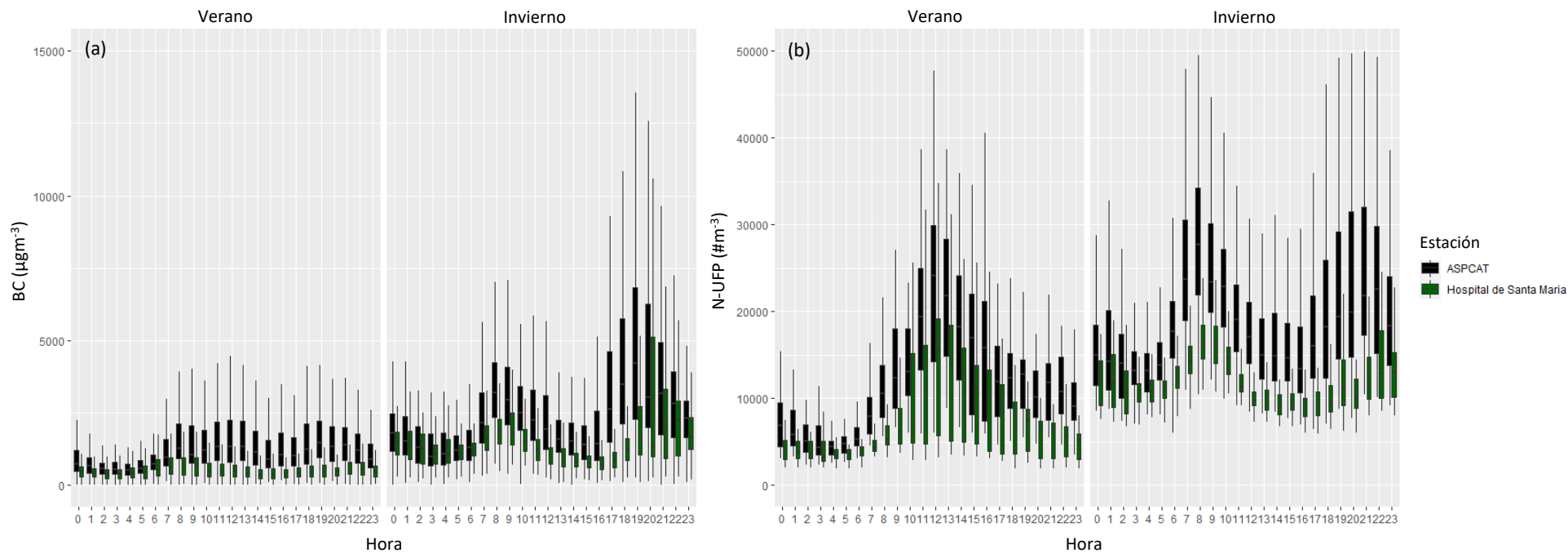


Figura 9. Ciclo diario de (a) carbono negro o BC y (b) partículas ultrafinas o N-UFP durante los dos periodos de estudio.

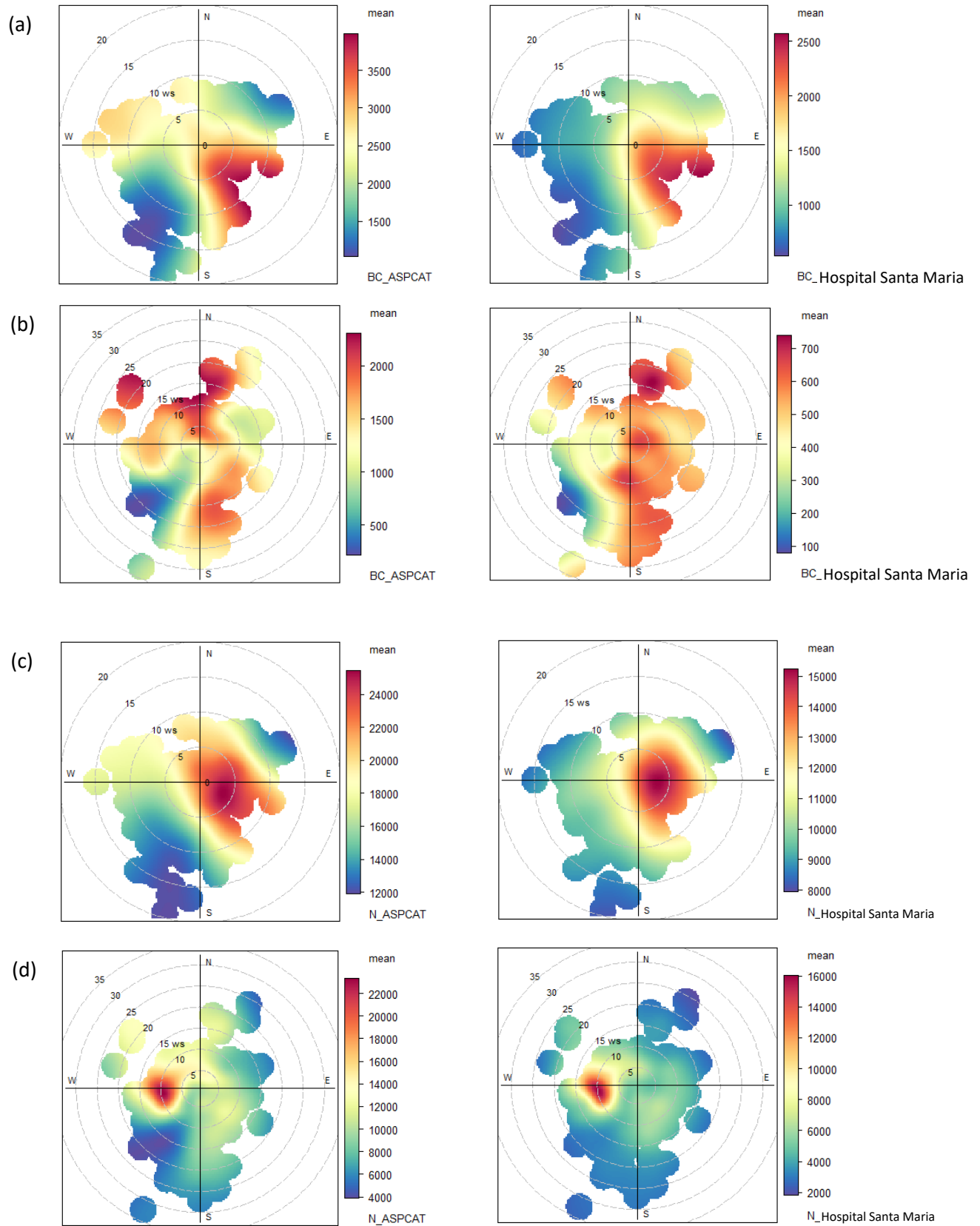


Figura 10. Diagramas polares de (a) BC en invierno, (b) BC en verano, (c) N-UFP en invierno y (d) N-UFP en verano en las dos estaciones temporales seleccionadas.

La Tabla 2 recoge las concentraciones medias de PM_{10} y $PM_{2.5}$ determinadas en las estaciones de ASPCAT y de Hospital de Santa María, en comparación con datos procedentes de la estación de control oficial. De nuevo las concentraciones en ASPCAT fueron más elevadas que en Hospital de Santa María en los dos periodos de estudio. En el caso de las concentraciones de PM_{10} en la estación de control oficial, estas fueron muy similares a las reportadas en ASPCAT durante el verano y ligeramente superiores en invierno, mientras que en ambos periodos estuvieron por encima de las registradas en Hospital de Santa María. Esto parece indicar que las concentraciones de PM_{10} medidas en la estación oficial estarían por encima de las registradas en fondo urbano. Cabe mencionar que, a modo de validación, se han realizado medidas con un equipo portátil DustTrak en puntos a distintas distancias de la estación oficial, obteniéndose en todos los casos concentraciones similares de PM_{10} (consultar ejemplos en el anexo, Figuras A3, A4 y A5).

La Figura 11 muestra los ciclos diarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para los muestreos de invierno y verano. Destacan las altas concentraciones mantenidas durante la noche, que pueden estar asociadas a situaciones de estancamiento y/o a la formación de partículas finas secundarias por procesos de condensación, así como máximos muy pronunciados de concentraciones de PM_{10} en invierno alrededor de la 17:00 h que podrían estar asociados a una fuente local (por ejemplo, la resuspensión de partículas finas y gruesas del parque próximo a la estación de medida). De nuevo, en las tres estaciones las concentraciones fueron más elevadas en el periodo de invierno, especialmente notable en el caso de la fracción $PM_{2.5}$. Los ratios $PM_{10}/PM_{2.5}$ fueron aproximadamente de 1.5 en invierno y 2.5 en verano. Este ratio tan elevado durante el verano puede deberse a fenómenos de resuspensión y/o intrusión de masas de aire de origen africano, mientras que la reducción en invierno puede estar asociada a una mayor generación de partículas secundarias de fracción fina ($PM_{2.5}$). No obstante, estos ratios deben ser considerados con cautela, ya que cabe recordar que las concentraciones se han medido con un equipo portátil, no de referencia, con ciertas limitaciones en lo referente a la distribución de tamaños de partícula.

Los diagramas polares de las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las dos estaciones temporales durante los dos periodos analizados muestran tendencias muy semejantes (Figura 12), con las concentraciones más elevadas desde el sector noreste, aunque se observan ligeramente más desplazadas al norte durante el verano, cuando además se registran concentraciones significativamente más elevadas en dirección sur que durante el invierno. Se observa un patrón muy similar para PM_{10} en la estación oficial, pero con concentraciones más altas asociadas a bajas velocidades de viento en invierno. Las altas concentraciones bajo condiciones de calma pueden estar relacionadas con un efecto de contaminación local.

Tabla 2. Concentraciones medias de PM_{2.5} (µg/m³) y PM₁₀ (µg/m³) recogidas en las estaciones de ASPCAT, Hospital de Santa María y en la estación oficial de la Generalitat.

	ASPCAT				Hospital Santa María				Estació Generalitat			
	Promedio	Percentil 90.4	Percentil 75	Percentil 25	Promedio	Percentil 90.4	Percentil 75	Percentil 25	Promedio	Percentil 90.4	Percentil 75	Percentil 25
Verano												
PM ₁₀ (µg/m ³)	30.8	42.0	37.5	23.2	19.6	28.2	24.7	12.9	26.2	42.0	32.0	17.0
PM _{2.5} (µg/m ³)	12.3	16.5	14.6	9.4	8.0	11.7	9.5	5.6	-	-	-	-
Invierno												
PM ₁₀ (µg/m ³)	32.0	50.4	38.6	22.8	26.6	38.9	31.7	18.8	37.2	60.0	45.3	24.0
PM _{2.5} (µg/m ³)	20.1	30.7	24.3	14.6	17.5	25.8	20.9	12.5	-	-	-	-
Promedio												
PM ₁₀ (µg/m ³)	31.7	48.7	38.0	22.8	23.6	36.1	28.7	16.6	30.2	51.0	37.0	19.0
PM _{2.5} (µg/m ³)	18.3	29.6	22.8	13.1	15.4	24.3	19.7	10.1				

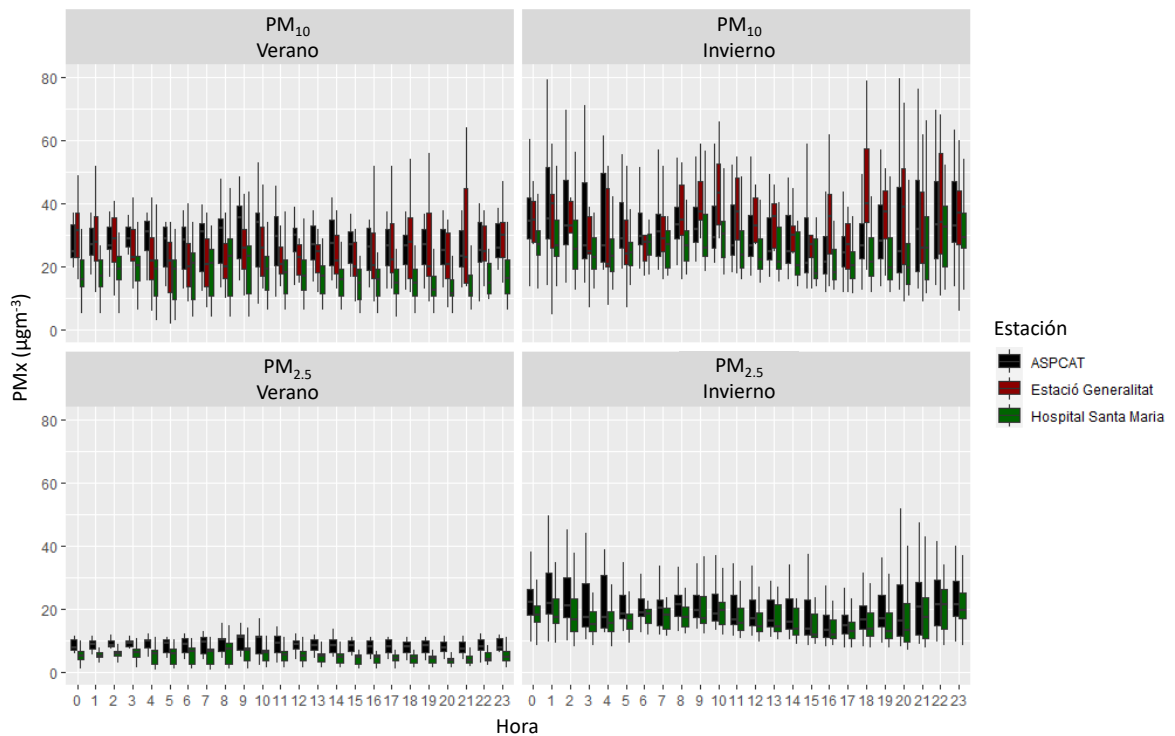
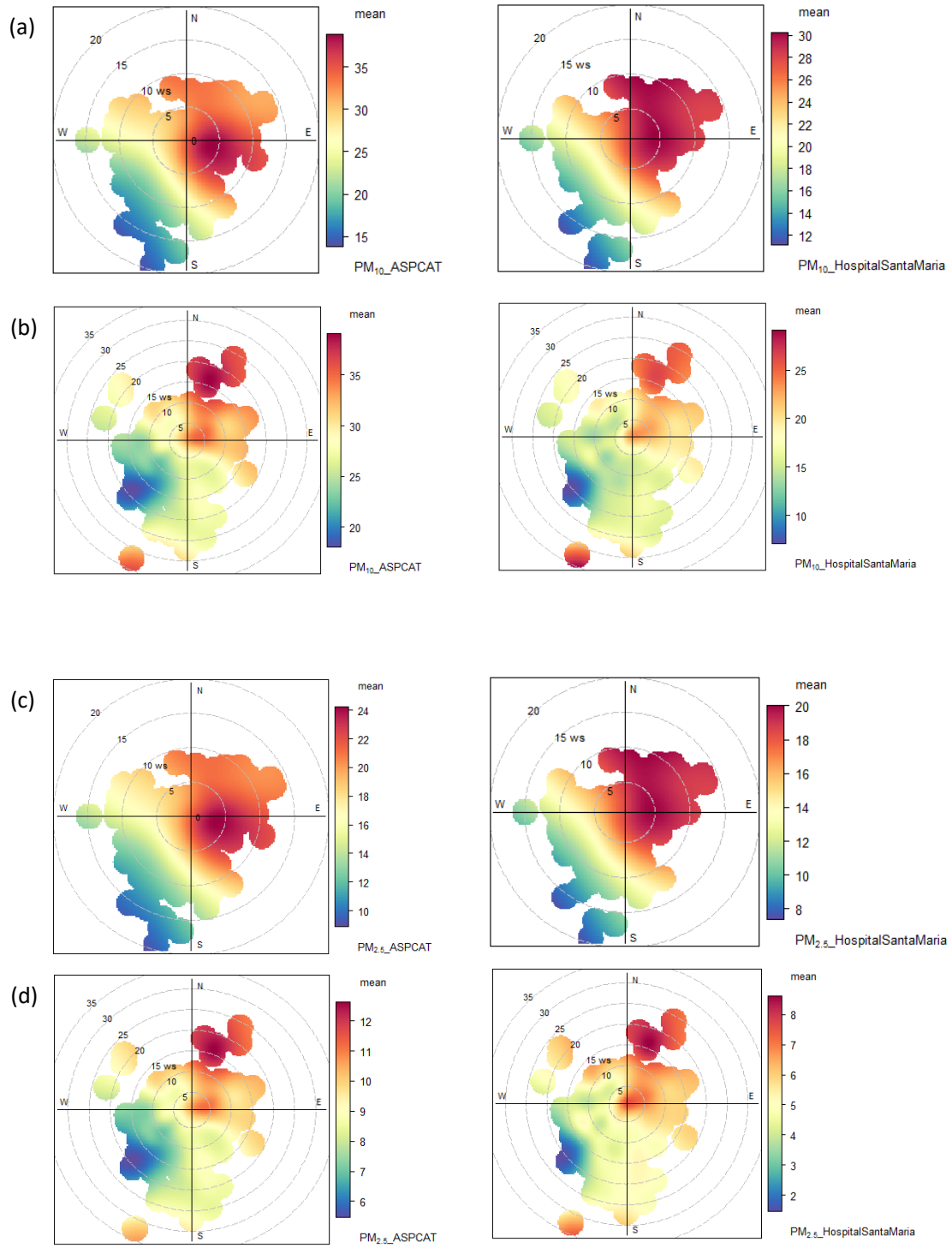


Figura 11. Ciclo diario de PM₁₀ y PM_{2.5} (µg/m³) durante los dos periodos de estudio.



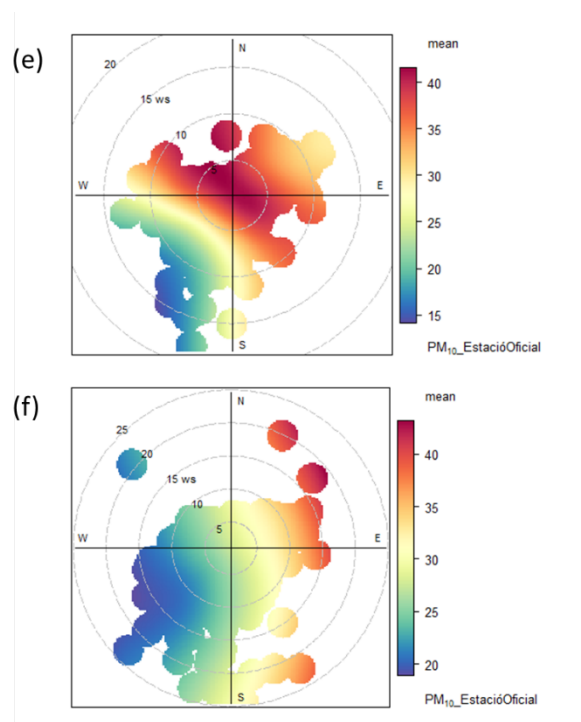


Figura 12. Diagramas polares de (a) PM_{10} en invierno, (b) PM_{10} en verano, (c) $PM_{2.5}$ en invierno y (d) $PM_{2.5}$ en verano en las dos estaciones temporales seleccionadas y de PM_{10} en la estación oficial en invierno (e) y en verano (f).

• CONCLUSIONES

El presente estudio se diseñó con el objetivo principal de conocer las concentraciones y la variación espacial de los principales contaminantes atmosféricos (PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 , partículas ultrafinas ó N-UFP, carbono negro ó BC, NH_3). Además, el estudio planteaba evaluar la representatividad de la ubicación de la estación de medida de referencia. Este trabajo supone un avance con respecto a la evaluación de las series temporales históricas y actuales de contaminantes en la ciudad de Lleida ya que (a) amplía significativamente la resolución espacial de los datos de NO_2 , lo que permite visualizar y evaluar la distribución espacial de este contaminante e identificar puntos calientes de emisión; (b) aporta datos de contaminantes no monitorizados con anterioridad, tales como carbono negro, partículas ultrafinas y amoníaco (NH_3); (c) aporta datos de contaminantes (PM_{10} , $PM_{2.5}$) en dos ubicaciones no monitorizadas anteriormente, lo cual permite determinar gradientes de concentración entre distintas zonas de la ciudad; y (d) proporciona información relevante acerca de las posibles fuentes de emisión de los contaminantes monitorizados.

Una vez finalizado el estudio es posible extraer las siguientes conclusiones principales:

- 1. Origen de los contaminantes atmosféricos en la ciudad de Lleida:** las concentraciones y patrones de contaminantes particulados y gaseosos observados durante el estudio sugieren la influencia de una combinación de

fuentes de emisión y procesos en la calidad del aire en la zona de estudio. Los principales serían (a) los procesos de estancamiento atmosférico característicos de la región, que favorecen la acumulación de contaminantes, (b) las emisiones del tráfico vehicular y (c) las emisiones de NH_3 de origen agrícola/ganadero, que favorecen a su vez la formación de aerosoles secundarios con contribución a los niveles de $\text{PM}_{2.5}$.

2. Variabilidad espacial de los principales contaminantes atmosféricos:

- a. NO_2 : se observa un patrón constante en el tiempo con concentraciones más elevadas próximas a las principales vías de tráfico. Ello indicaría que el tráfico rodado constituye una fuente de emisión de NO_2 significativa en la ciudad.
- b. Partículas atmosféricas ($\text{PM}_{2.5}$, carbono negro, partículas ultrafinas): de forma similar a lo observado para NO_2 , aunque con menor resolución espacial, se observan concentraciones de partículas más elevadas en la ubicación más próxima al tráfico al tratarse éste de una fuente de emisión relevante. Al margen de esto, se identifican también otros procesos como la formación de nuevas partículas (nucleación) con influencia en las concentraciones de partículas ultrafinas.
- c. NH_3 : se aprecian concentraciones de NH_3 relativamente homogéneas a lo largo de la ciudad, lo que sugiere la influencia de fuentes de origen regional (agricultura/ganadería).
- d. PM_{10} : las concentraciones de PM_{10} en la estación oficial son superiores a las medidas en la estación de fondo urbano temporal seleccionada y muy similares a la ubicación temporal seleccionada con mayor influencia del tráfico. Son concentraciones relativamente elevadas (1.5 veces superiores a las registradas en determinadas ubicaciones de fondo urbano, por ejemplo) y se aprecia en ellas cierto impacto de una fuente local.

3. Concentraciones de los principales contaminantes atmosféricos: el estudio se llevó a cabo durante dos periodos de 2 semanas (invierno y verano, respectivamente), por lo que los niveles determinados no deben considerarse representativos del promedio anual ni compararse con valores límite normativos. Al margen de esto, se observó que:

- a. Los factores meteorológicos parecen jugar un papel importante en las concentraciones de los contaminantes estudiados y serían en gran parte responsables de las diferencias observadas entre invierno y verano. Para todos los parámetros se observan concentraciones más elevadas en invierno, cuando probablemente se dieron condiciones de escasa dispersión.
- b. **NO_2** : las concentraciones de NO_2 en el fondo urbano pueden considerarse en el límite inferior del rango típico para entornos urbanos, sin detectarse apenas superaciones del límite legal horario o diario, aunque sí se superarían las directrices marcadas por la OMS. La estación oficial estaría representando zonas de la ciudad con bajas concentraciones de NO_2 .
- c. **NH_3** : las concentraciones de NH_3 se consideran elevadas para un entorno urbano, en comparación con otras zona urbanas europeas, mientras que son

similares a las registradas en otros entornos suburbanos. Esto podría tener un impacto relevante en la generación de partículas finas ($PM_{2.5}$), al tratarse de un gas precursor.

- d. **BC y N-UFP:** las concentraciones de BC y UFP fueron significativamente más elevadas en invierno, tanto en la estación clasificada de tráfico como en la de fondo, considerándose elevadas en este periodo, quedando las relativas a N-UFP por encima de lo recomendado por la OMS. Las concentraciones medias en la estación de fondo durante el invierno son muy similares a las reportadas típicamente en ubicaciones de fondo urbano. Además, los ciclos diarios de estos parámetros (y del NO_2) parecen marcados por las horas de mayor estancamiento atmosférico y de mayor tráfico vehicular, aunque es necesario también destacar la influencia de procesos de nucleación en las concentraciones de N-UFP en verano.

Finalmente, en lo que se refiere a la representatividad de la ubicación de la estación de medida de referencia, los datos del estudio muestran que mientras que las concentraciones de NO_2 se encuentran en el rango inferior del rango típico para entornos urbanos, las concentraciones de PM_{10} son superiores a las esperables en una ubicación de estas características. Cabe destacar que el ratio $PM_{10}/PM_{2.5}$ es muy alto en la estación de referencia en verano, lo que podría deberse a procesos de resuspensión y/o intrusión de masas de aire africano. Sería importante continuar caracterizando este parámetro en futuros estudios para confirmar la causa, ya que en este caso las medidas se han recogido con un equipo que no es de referencia. Así, sería recomendable llevar a cabo la caracterización química de las partículas en muestras de PM_{10} para aportar información sobre el posible origen de las altas concentraciones registradas de forma episódica en la estación de referencia. Otros estudios futuros que permitirían profundizar en el origen de dichas concentraciones y avanzar en el estudio de la calidad del aire en Lleida incluirían el análisis de series temporales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ recientes (desde febrero de 2023) con nueva instrumentación de medida instalada en la estación, el análisis de series históricas de los contaminantes registrados en la estación, y la recogida y análisis de muestras de PM_{10} y $PM_{2.5}$, en invierno y verano, en una ubicación próxima a la estación pero alejada de la posible influencia de los aerosoles minerales resuspendidos en el entorno de la misma.

Por último, la literatura es amplia en cuanto a posibles estrategias de mitigación para reducir las concentraciones de contaminantes atmosféricos en entornos urbanos. Concretamente, el proyecto europeo AIRUSE (<http://airuse.eu/>) llevó a cabo una revisión en profundidad de las estrategias disponibles y de su eficacia en diferentes entornos europeos, con especial énfasis en el sur de Europa y las condiciones meteorológicas mediterráneas. En los informes del proyecto es posible encontrar datos acerca de la eficacia de medidas como la aplicación de estrategias de riego o de compuestos para minimizar la resuspensión de polvo de carretera, medidas para reducir el tráfico vehicular y sus impactos, o medidas para minimizar el impacto de las emisiones

de combustión residencial (<http://airuse.eu/outcomes/publications/>), cuya utilidad se podría valorar para el caso de la ciudad de Lleida.

- **BIBLIOGRAFÍA**

Generalitat de Catalunya, Direcció General de Qualitat Ambiental i Canvi Climàtic (2022) La qualitat de l'aire a Catalunya, Anuari 2022; www.mediambient.gencat.cat.

Reche C, Viana M, Karanasiou A, Cusack M, Alastuey A, Artiñano B, Revuelta MA, López-Mahía P, Blanco-Heras G, Rodríguez S, Sánchez de la Campa AM, Fernández-Camacho R, González-Castanedo Y, Mantilla E, Tang YS, Querol X. Urban NH₃ levels and sources in six major Spanish cities. *Chemosphere*. 2015 Jan;119:769-777. doi: 10.1016/j.chemosphere.2014.07.097. Epub 2014 Sep 6. PMID: 25194477.

Rivas, I., David C.S. Beddows, Fulvio Amato, David C. Green, Leena Järvi, Christoph Hueglin, Cristina Reche, Hilka Timonen, Gary W. Fuller, Jarkko V. Niemi, Noemí Pérez, Minna Aurela, Philip K. Hopke, Andrés Alastuey, Markku Kulmala, Roy M. Harrison, Xavier Querol, Frank J. Kelly. Source apportionment of particle number size distribution in urban background and traffic stations in four European cities, *Environment International*, Volume 135, 2020, 105345, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105345>.

Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Clerbaux, C., Coheur, P.F., 2018. Industrial and agricultural ammonia point sources exposed. *Nature*, 564, 99-103, 10.1038/s41586-018-0747-1

ANEXO

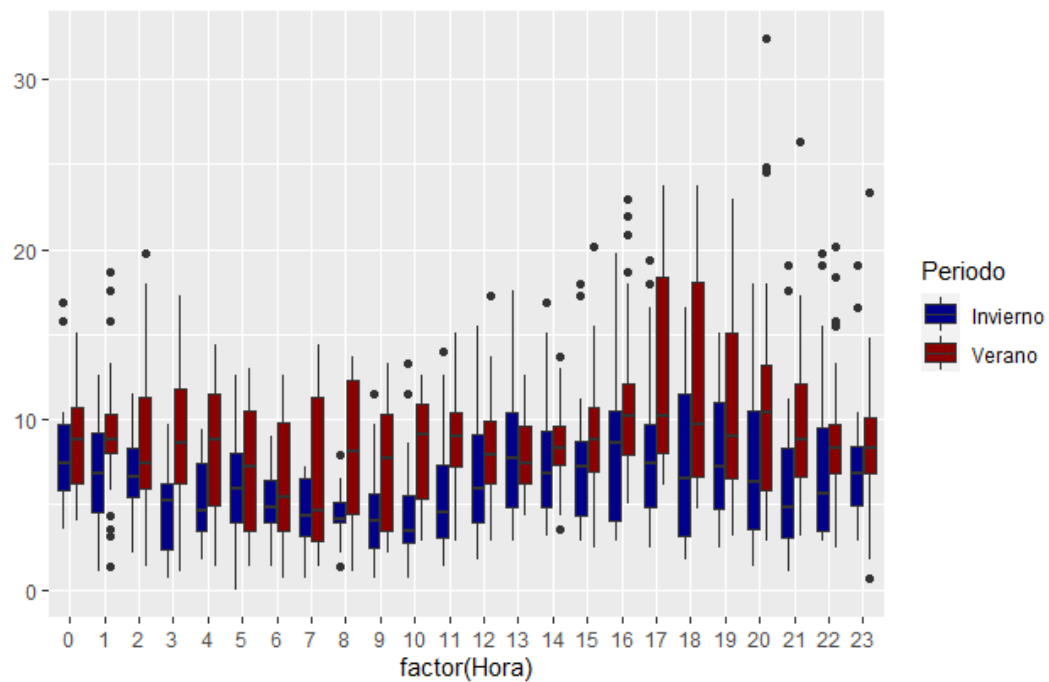


Figura A1. Ciclo diario de la velocidad del viento (m/s) reportada en la estación de la Femosa durante los dos periodos de estudio.

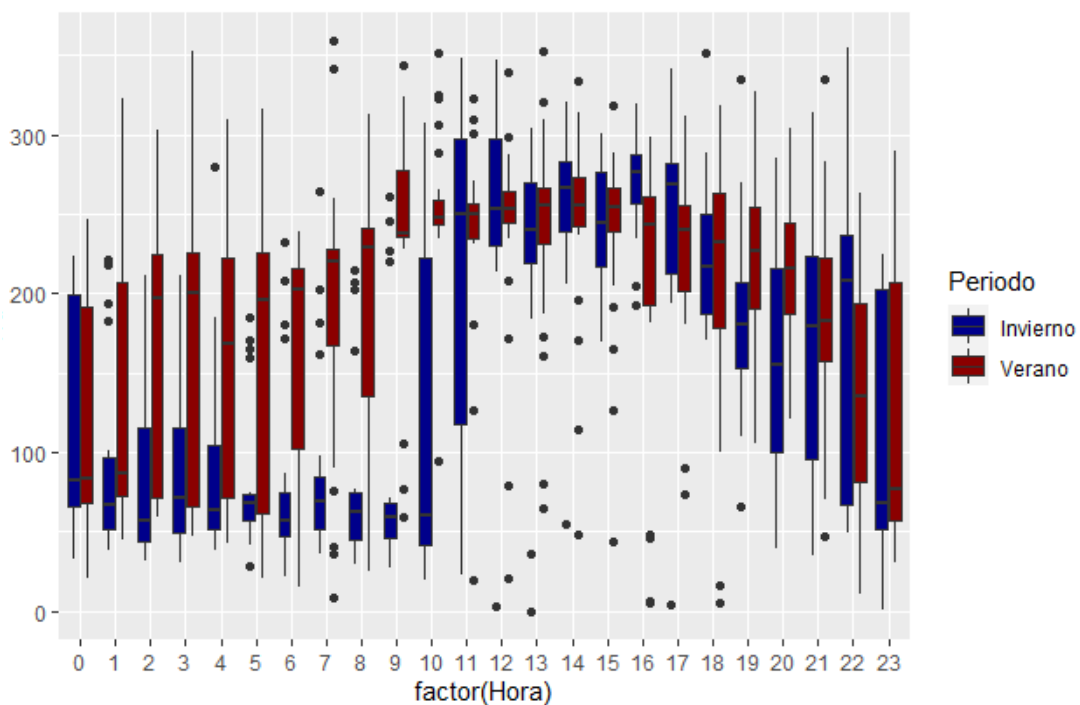


Figura A2. Ciclo diario de la dirección del viento (°) reportada en la estación de la Femosa durante los dos periodos de estudio.

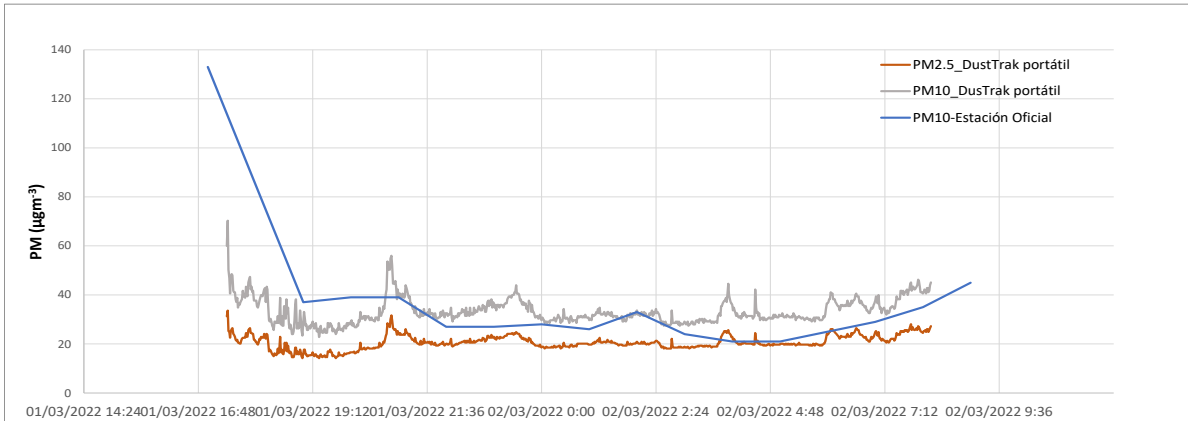


Figura A3. Concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} medidas con equipo portátil comparadas con las concentraciones de PM₁₀ medidas en la estación oficial.

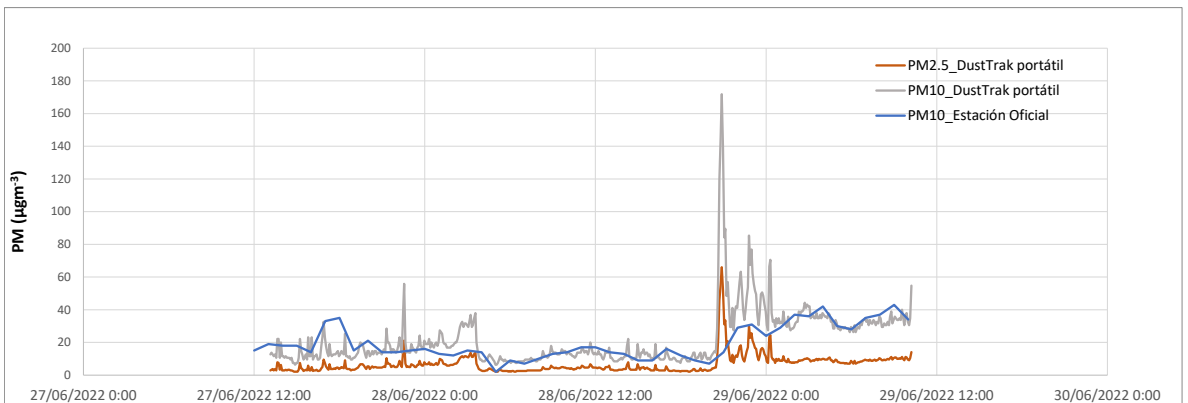


Figura A4. Concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} medidas con equipo portátil comparadas con las concentraciones de PM₁₀ medidas en la estación oficial.

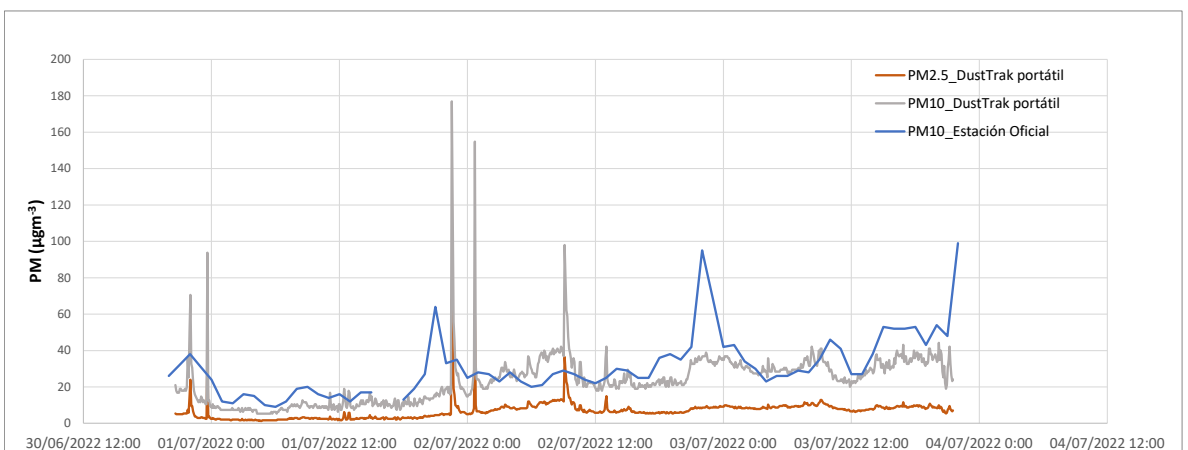


Figura A5. Concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} medidas con equipo portátil comparadas con las concentraciones de PM₁₀ medidas en la estación oficial.