

Evaluación de la calidad del aire en Granada





Evaluación de la calidad del aire en Granada.

Juan Carlos Gómez Martín, Nora Miñán Nobs, Evaristo Romera, Juan Miguel Ruiz Hidalgo, Álvaro Isabel, Antonio Jesús Ocaña Fernández, Rafael Martín Pérez, Maryin Navarro Rangel y el equipo de voluntariado del proyecto *Ciudades Respirables – Ciudades Sostenibles*.

Diseño y maquetación: malisia.net

Contenido

Resumen	7
01. Antecedentes	9
1.1. Importancia de la calidad del aire	9
1.2. Legislación aplicable y recomendaciones sanitarias	11
1.3. Calidad del aire en Granada	14
1.3.1. Breve apunte sobre la meteorología en Granada	14
1.3.2. Medidas de materia particulada en la RVCCA	15
1.3.3. Calidad del aire según las medidas de la RVCCA	17
1.3.4. Medidas de calidad del aire ajenas a la RVCCA en Granada	20
1.4. Contexto socio-económico	22
02. Justificación y objetivos	25
03. Metodología	29
3.1. Sensores	29
3.1.1. Técnica de medida de partículas	31
3.1.2. Calibración y seguimiento de deriva	34
3.1.3. Estatus legal de los sensores de bajo coste	37
3.2. Sensores	39
3.2.1. Medidas fijas	39
3.2.1.1. Localizaciones	39
3.2.1.2. Adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos	41
3.2.1.3. Eliminación de los datos obtenidos durante eventos de intrusión de polvo sahariano	44
3.2.2. Medidas móviles	45
3.2.2.1. Adquisición y almacenamiento de datos	45
3.2.2.2. Área de muestreo y medios de locomoción	47
3.2.2.3. Selección de los días y las franjas horarias de muestreo	48
3.2.2.4. Datos de referencia y normalización	49
3.2.2.5. Interpolación y generación de mapas	49
04. Resultados	53
4.1. Medidas fijas	53
4.1.1. Calidad de los datos y filtrado	53
4.1.2. Calibraciones	56
4.1.2.1. Calibraciones del factor de masa y su deriva	57

4.1.2.2. Calibración de $PM_{2.5}$	61
4.1.2.3. Corrección de las medidas de humedad relativa	64
4.1.2.4. Corrección de crecimiento higroscópico	66
4.1.3. Estimación de incertidumbre y límite de detección	67
4.1.4. Promedios diarios	70
4.1.5. Evolución diaria	76
4.1.6. Evolución semanal	77
4.1.7. Evolución anual	80
4.1.4. Promedios anuales	82
4.2. Medidas móviles	83
4.2.1. Series completas y resumen estadístico	83
4.2.2. Patrones espaciales	88
05. Discusión	97
5.1. Interpretación de la evolución diaria, semanal y anual	97
5.2. Diferencias con las medidas de referencia	98
5.3. Comparación con los umbrales legales y las recomendaciones sanitarias	99
5.4. Interpretación de los patrones espaciales	99
5.5. Conclusión y resumen	100
5.6. Propuestas	102
5.6.1. Mejora de la monitorización y la comunicación de la calidad del aire	102
5.6.2. Propuestas relativas a la reducción de emisiones	04
5.6.2.1. Movilidad	104
5.6.2.2. Eficiencia energética y edificios	107
5.6.2.3. Industria y actividad comercial	109
5.6.2.4. Espacios verdes y captura de contaminantes	110
5.6.2.5. Educación ambiental y participación ciudadana	111
Anexos	115
Anexo I. Metodología de Cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA)	115
Tratamiento Temporal de Datos	15
Puntos de Corte y Categorización	116
Criterio de Integración (Peor Valor)	116
Referencias bibliográficas	119
Agradecimientos	123

Tablas y Figuras

Tabla 1. _____	13	Figura 1. _____	29
Tabla 2. _____	17	Figura 2. _____	30
Tabla 3. _____	32	Figura 3. _____	36
Tabla 4. _____	41	Figura 4. _____	37
Tabla 5. _____	54	Figura 5. _____	43
Tabla 6. _____	56	Figura 6. _____	45
Tabla 7. _____	57	Figura 7. _____	46
Tabla 8. _____	59	Figura 8. _____	47
Tabla 9. _____	62	Figura 9. _____	55
Tabla 10. _____	65	Figura 10. _____	58
Tabla 11. _____	69	Figura 11. _____	60
Tabla 12. _____	71	Figura 12. _____	60
Tabla 13. _____	74	Figura 13. _____	62
Tabla 14. _____	83	Figura 14. _____	63
Tabla 15. _____	85	Figura 15. _____	63
Tabla 16. _____	85	Figura 16. _____	65
Tabla 17. _____	86	Figura 17. _____	67
Tabla 18. _____	86	Figura 18. _____	68
		Figura 19. _____	70
		Figura 20. _____	73
		Figura 21. _____	74
		Figura 22. _____	75
		Figura 23. _____	76
		Figura 24. _____	77
		Figura 25. _____	78
		Figura 26. _____	79
		Figura 27. _____	80
		Figura 28. _____	81
		Figura 29. _____	82
		Figura 30. _____	87
		Figura 31. _____	88
		Figura 32. _____	90
		Figura 33. _____	91
		Figura 34. _____	92
		Figura 35. _____	93
		Figura 36. _____	94
		Figura 37. _____	97





Resumen

Utilizando una metodología de ciencia ciudadana, el proyecto «**Ciudades Respirables – Ciudades Sostenibles**» de la ONG **accionenered-Andalucía** ha realizado una monitorización de la contaminación atmosférica por partículas en suspensión en la ciudad de Granada entre marzo de 2024 y febrero de 2026. Para ello se han utilizado sensores de $PM_{2.5}$ y PM_{10} por dispersión de luz láser de bajo coste referenciados a un sensor certificado (microbalanza de elemento oscilante) para realizar mediciones indicativas validadas post-hoc siguiendo los requisitos técnicos de la nueva directiva europea de calidad del aire (Directiva UE 2024/2881). Se han obtenido series temporales multianuales en tres localizaciones fijas y se han realizado muestreos espaciales mediante sensores adaptados por los participantes en el proyecto para medidas itinerantes, complementadas con interpolación espacial basada en un sistema de información geográfica.

«**Ciudades Respirables – Ciudades Sostenibles**» demuestra que las redes de sensores de bajo coste debidamente calibradas pueden proporcionar medidas distribuidas para extender la cobertura espacial de las redes oficiales y científicas de monitorización de la calidad del aire, revelando patrones espaciales y heterogeneidades que no son detectadas por estas. En el caso de Granada, los resultados del proyecto indican que varias zonas de la capital, incluyendo el centro histórico, podrían mostrar niveles de polución atmosférica más altos que los medidos por las dos estaciones de la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire de la Junta de Andalucía. **En este informe se describen las potencialidades limitaciones de los sensores y la metodología de calibración y medida, se analizan los resultados obtenidos comparándolos con mediciones previas con instrumentación certificada, y se estudian propuestas para mejorar la calidad del aire en Granada y su área metropolitana.**





01. Antecedentes

1.1. Importancia de la calidad del aire

La contaminación ambiental es una de las mayores amenazas tanto a nivel global como a nivel local para la salud humana. Esta se define como la presencia en atmósfera de partículas sólidas, líquidas y gases en concentraciones suficientes que producen efectos adversos sobre la salud humana y el ambiente.

En este sentido se han definido unos parámetros cuantitativos de calidad del aire que depende tanto de la concentración de las partículas en atmósfera como de los diferentes tiempos de exposición de las personas. Dentro de estos parámetros establecidos para determinar calidad de aire es importante diferenciar los valores establecidos legalmente de los que se consideran adecuados para una correcta salud pública. Finalmente se establecen unos niveles de los diferentes contaminantes que cuando son superados aumenta de forma cuantitativa el riesgo para la salud.

La organización mundial de la salud (OMS) ha establecido los altos riesgos para la salud que están asociados a la contaminación atmosférica y la mala calidad del aire y la relación con la aparición de múltiples patologías que pueden derivar en muerte o en grandes pérdidas de años de salud, pudiéndose cuantificar entre 4 y 9 millones de muertes atribuibles a la contaminación ambiental y cientos de millones de años de vida saludable perdidos y estableciéndose la contaminación ambiental como un factor de riesgo similar a tener una dieta no saludable o al tabaquismo (WHO 2021). Además, también tiene implicaciones económicas debida a la pérdida de días laborales, enfermedad y pérdida del bienestar de las personas.

Respecto a la presencia de los distintos contaminantes sólidos y gaseosos que determinan la mala calidad del aire hay claramente la evidencia causal entre la presencia de las diferentes partículas o gases y la aparición algunas de las siguientes patologías: cardiopatía isquémica, accidente cerebrovascular, enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), cáncer de pulmón, infecciones respiratorias agudas, diabetes tipo II y mortalidad neonatal.

Al analizar la contaminación atmosférica generalmente los contaminantes que se encuentran bajo control son los siguientes: Material particulado ($PM_{2.5}$ partículas con diámetro aerodinámico $\leq 2.5 \mu m$ y PM_{10} partículas con diámetro aerodinámico $\leq 10 \mu m$), y gases como el ozono (O_3), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO).

En primer lugar, el material particulado (PM), registra una diferenciación entre material particulado grueso (PM_{10}) y fino ($PM_{2.5}$), con ciertas diferencias sobre sus efectos en la salud. El $PM_{2.5}$, al ser un tamaño más fino de partícula, tiene una penetración biológica profunda llegando a nivel alveolar y por lo tanto presenta una fuerte asociación con diversas patologías, y representa el mayor componente de la carga global de enfermedad por contaminación atmosférica. De esta forma se ha establecido la relación entre la exposición prolongada a niveles considerables de $PM_{2.5}$ y procesos fisiopatológicos como procesos de inflamación, estrés oxidativo, activación protrombótica o alteraciones metabólicas, lo cual establece una asociación entre la exposición a $PM_{2.5}$ y la aparición del índice de mortalidad por patologías como las mencionadas anteriormente.

En relación al PM_{10} hay que tener en cuenta que aunque debido a su diámetro tiene una penetración biológica menor que el $PM_{2.5}$, la exposición a PM_{10} también se asocia con el aumento de la mortalidad en hospitalizaciones por problemas respiratorios, exacerbación de asma o EPOC. Así, el PM_{10} aún con menor penetración biológica que el $PM_{2.5}$ se considera un indicador clave de la vinculación de la contaminación atmosférica con el riesgo respiratorio y cardiovascular asociado a la misma.

El resto de los contaminantes tienen una importancia secundaria a la hora de seguir sus niveles, pero siguen teniendo importancia en algunos aspectos como por el ejemplo el ozono el cual tiene una elevada importancia vinculados a patologías como la EPOC y el asma debido a su exposición. Otros contaminantes presentes en el aire que tiene su importancia a la hora y en forma de monitorizar los niveles de contaminación ambiental como son NO_2 vinculado a las emisiones de tráfico y combustiones o el dióxido de azufre en determinadas zonas industriales.

En conclusión, según los estudios de la OMS podemos establecer que la contaminación del aire es el principal riesgo ambiental para la salud global y dentro de la misma las $PM_{2.5}$ es el contaminante más determinante en la presencia de patologías y la mortalidad. También se establece que no existe evidencia de un umbral seguro y de la presencia de contaminantes atmosféricos y se pueden observar claras evidencias que la reducción de concentraciones de mismos genera beneficios proporcionales en salud.

1.2. Legislación aplicable y recomendaciones sanitarias

La regulación de la calidad del aire en España se articula a través de un sistema normativo multinivel en el que confluyen disposiciones europeas, estatales y autonómicas, creando un entramado de protección que va desde las directrices de Bruselas hasta la gestión municipal en Granada. El eje central de este marco jurídico nacional es la Ley 34/2007, de calidad del aire y protección de la atmósfera, la cual establece los principios básicos para prevenir, vigilar y reducir la contaminación (Ley 34/2007, Art. 1). Esta ley tiene como finalidad primordial proteger la salud humana, los ecosistemas y el medio ambiente en general frente a los efectos adversos derivados de los contaminantes. Entre sus previsiones más relevantes destaca la obligación impuesta a las comunidades autónomas de elaborar planes y programas de mejora cuando en determinadas zonas se superen los valores límite legalmente establecidos (Ley 34/2007, Art. 16). Dichos planes deben incluir medidas concretas, calendarios de ejecución y acciones estructurales orientadas a fomentar la movilidad sostenible y reducir las emisiones del tráfico rodado, permitiendo incluso restricciones temporales a la circulación en situaciones de grave contaminación.

El desarrollo reglamentario de esta ley se concreta en el Real Decreto 102/2011, el cual ha sido recientemente actualizado por el Real Decreto 34/2023 para adaptarse a las nuevas exigencias de gobernanza y transparencia en la difusión de datos (RD 34/2023, Disposición final primera). Este marco define con precisión los valores límite, valores objetivo y umbrales de información para los principales contaminantes, entre ellos las partículas en suspensión PM_{10} y $PM_{2.5}$, el dióxido de nitrógeno (NO_2), el ozono (O_3) y el dióxido de azufre (SO_2) (RD 102/2011, Anexo I). En aplicación de esta normativa, el territorio se divide en zonas y aglomeraciones para evaluar de manera diferenciada la calidad del aire. En el caso de Andalucía, la gestión se complementa con la Ley 7/2007 de Gestión Integrada de la Calidad Ambiental (GICA) y el Decreto 239/2011, que estructura el sistema andaluz de evaluación (Decreto 239/2011, Art. 5). A ello se suma la Estrategia Andaluza de Calidad del Aire, que presta especial atención a Granada debido a su compleja orografía; la «cuenca granadina» favorece la inversión térmica, atrapando los contaminantes a baja cota y dificultando su dispersión natural (Plan de Mejora de Calidad del Aire de la Aglomeración de Granada, 2020). La gestión y medición de la calidad del aire en Andalucía recae sobre la Consejería de Sostenibilidad y Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Esta labor se ejecuta a través de la Red de Vigilancia y Control de la Calidad del Aire (RVCCA), que opera estaciones propias y supervisa las redes privadas de industrias autorizadas.

Uno de los instrumentos fundamentales de información pública es el Índice de Calidad del Aire (ICA), que traduce datos técnicos en una escala comprensible. El cálculo técnico del ICA en el sistema español (ver) se rige por una metodología de normalización de datos capturados en tiempo real (Orden TEC/351/2019). Para contaminantes como PM_{10} y $PM_{2.5}$, el cálculo no se basa en una medición instantánea, sino en la media móvil troncada de las últimas 24 horas (Metodología del Índice Nacional de Calidad del Aire, MITECO). Una vez obtenida la concentración media, se asigna la categoría del contaminante que presente la peor situación, aplicando un criterio de precaución sanitaria (RD 102/2011, Anexo XI). Esta escala se acompaña de recomendaciones específicas para la población general y grupos vulnerables, instando a reducir la actividad física al aire libre cuando los niveles superan los umbrales de seguridad.

En cuanto a los valores límite (**Tabla 1**) aplicables a las partículas bajo el vigente RD 102/2011, se establece para las Partículas PM_{10} un valor límite diario de $50 \mu g/m^3$ que no puede superarse en más de 35 ocasiones por año natural, además de una media anual de $40 \mu g/m^3$ (RD 102/2011, Anexo VI). Para las $PM_{2.5}$, el valor límite anual se fija actualmente en $25 \mu g/m^3$ (RD 102/2011, Anexo VI). Estos estándares constituyen la referencia jurídica básica actual, pero la legislación europea ha evolucionado recientemente hacia criterios mucho más estrictos con la aprobación de la Directiva (UE) 2024/2881. Esta nueva norma establece un horizonte para 2030 donde los límites se reducirán drásticamente: el valor anual de las $PM_{2.5}$ bajará a $10 \mu g/m^3$ y el de las PM_{10} a $20 \mu g/m^3$ (Directiva UE 2024/2881, Anexo I). Es importante destacar que en el cálculo del ICA no se descuentan datos afectados por intrusiones de polvo sahariano, dado que es un indicador de salud pública inmediata independientemente del origen de las partículas. Sin embargo, en la evaluación anual de la calidad del aire sí se permite el descuento de fuentes naturales, de forma que si una ciudad supera los límites legales puede corregir los datos afectados por fenómenos naturales para evitar sanciones, ya que no son culpa de las emisiones locales.

Finalmente, las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), actualizadas en 2021, establecen valores guía que son incluso más exigentes que la futura ley europea. La OMS recomienda que la media anual de $PM_{2.5}$ no supere los $5 \mu g/m^3$ y que la de PM_{10} no exceda los $15 \mu g/m^3$ (WHO 2021).

Tabla 1. Valores límite anuales aplicables a las partículas bajo la legislación vigente y la que entrará en vigor en 2030, junto con los recomendados por la OMS.

CONTAMINANTE (MEDIA ANUAL)	LEY ACTUAL (RD 102/2011) MG/M ³	UE 2024/2881 (2030) MG/M ³	GUÍA OMS (2021) MG/M ³
Partículas PM _{2.5}	25	10	5
Partículas PM ₁₀	40	20	15
Dióxido de Nitrógeno NO ₂	40	20	10

Aunque estas cifras no tienen carácter vinculante jurídicamente, constituyen la referencia científica de mayor relevancia (WHO 2021). En conclusión, el sistema normativo aplicable en Granada integra obligaciones que determinan tanto la vigilancia como la intervención administrativa. La evolución del derecho europeo y las directrices de la OMS apuntan a un escenario de exigencia creciente, lo que implica que las políticas locales en Granada deberán intensificar las medidas de reducción de emisiones para garantizar una protección efectiva de la salud de sus habitantes.

El Real Decreto 102/2011 establece que el único método de referencia oficial para la medida de la concentración de partículas es el gravimétrico, el cual se basa en la captación de las partículas en un filtro mediante un muestreador de bajo o alto volumen y su posterior pesaje en condiciones controladas de laboratorio. El estándar técnico que define este procedimiento, tanto para PM₁₀ como para PM_{2.5} es la norma UNE-EN 12341 (2015). Los sistemas de medición automática en tiempo real, tales como los analizadores basados en el principio de atenuación de radiación beta (conocidos por el acrónimo inglés BAM, *Beta Attenuation Monitor*) o las microbalanzas de elemento oscilante (denominadas TEOM, *tapered element oscillating microbalance*), carecen de la consideración de método de referencia. No obstante, el Real Decreto 102/2011 faculta su uso bajo la denominación de métodos equivalentes, condicionando su validez legal a que el titular de la red demuestre documentalmente una correlación estricta con el método gravimétrico. Este procedimiento de validación exige habitualmente la aplicación de factores de corrección específicos sobre las lecturas automáticas para subsanar las desviaciones sistemáticas respecto al pesaje manual, asegurando así que el dato reportado sea jurídicamente vinculante frente a los valores límite de protección de la salud. La norma UNE-EN 16450 establece los requisitos de funcionamiento y el procedimiento de certificación de equivalencia para sistemas automáticos de medición de partículas PM₁₀ y PM_{2.5}.

Un equipo que cumpla la UNE-EN 16450 para ser legalmente vinculante supone una inversión inicial mínima de unos 20.000 €, sin contar la infraestructura necesaria para que funcione. Sin embargo, además de las tecnologías certificadas, existen métodos de medida de la concentración de partículas basados en dispersión de luz láser que por su bajo coste se han popularizado en los últimos años. Estos sensores no tienen validez para vigilar el cumplimiento de los límites legales establecidos en el Real Decreto 102/2011, ya que no cumplen con los requisitos para la certificación de equivalencia según la norma UNE-EN 16450, ni pueden garantizar la equivalencia con el método gravimétrico ([ver sección 3.1](#)). Sin embargo, la legislación europea, a través de la Directiva (UE) 2024/2881, sí contempla el uso de estos dispositivos bajo una categoría específica denominada mediciones indicativas. Para estas se establece un uso complementario a las mediciones de referencia y equivalentes, permitiéndose reducir el número de estaciones de referencia fijas hasta en un 50 % si se suplementan con mediciones indicativas, siempre que el área no supere los umbrales de evaluación superiores. No obstante, a pesar de su utilidad para mapear áreas con alta resolución espacial o identificar fuentes de emisión, estos sensores no pueden utilizarse de forma aislada para certificar el cumplimiento de los valores límite legales. Su función es estrictamente de apoyo a las redes oficiales para completar lagunas de información. Los sensores ópticos de gama alta tienen precios que oscilan entre los 2000 y los 6000 €, mientras que los de gama baja rondan los 100 €.

1.3. Calidad del aire en Granada

1.3.1. Breve apunte sobre la meteorología en Granada

El Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra de Andalucía (IIISTA) presentó en 2016 un informe sobre la calidad del aire al ayuntamiento de Granada (Casquero Vera et al. 2016), en el que se describe cómo los niveles de contaminación en la ciudad están fuertemente condicionados por su situación geográfica. El clima de Granada y su área metropolitana es mediterráneo continentalizado, con inviernos fríos y veranos calurosos, además de una fuerte amplitud térmica diaria que puede sobrepasar los 20 °C. Las precipitaciones, que son un eficaz agente limpiador de contaminantes atmosféricos, se concentran desde el otoño hasta la primavera, siendo prácticamente nulas en verano. La humedad relativa es baja, especialmente en primavera y verano, lo que favorece la sequedad del suelo y la resuspensión de partículas. El viento presenta un marcado patrón diurno: por la noche y la madrugada

da es débil, lo que provoca el estancamiento de contaminantes, mientras que por la tarde alcanza su máxima intensidad, facilitando su dispersión. La dirección predominante es de componente sur, con velocidades más altas que pueden transportar contaminantes desde la Vega hacia la ciudad. Otro factor clave es la altura de la capa de mezcla: en verano supera los 2 km sobre el nivel del mar (unos 1,4 km sobre la ciudad), dispersando eficazmente los contaminantes; en invierno, en cambio, es muy baja (a veces inferior a 0,5 km), confinando las emisiones cerca de la superficie. Además, su evolución diurna es más tardía en esta estación, lo que prolonga el confinamiento matutino de los contaminantes emitidos por el tráfico y las calefacciones domésticas. Granada se ubica en una depresión rodeada de montañas, lo que genera un confinamiento topográfico. En invierno, el aire frío descendente de Sierra Nevada se acumula en el fondo del valle, reforzando las inversiones térmicas y reduciendo la capacidad de dispersión vertical de los contaminantes. Las montañas circundantes dificultan además la ventilación horizontal, limitando la renovación del aire y disminuyendo el volumen efectivo para la dilución de las emisiones, lo que agrava significativamente los episodios de contaminación elevada durante los meses fríos.

1.3.2. Medidas de materia particulada en la RVCCA

La monitorización oficial de la calidad del aire en Granada es competencia exclusiva de la RVCCA, gestionada por la Junta de Andalucía. En la actualidad, la capital cuenta con dos únicas estaciones de medición fijas: una denominada Granada-Norte ubicada en la Avenida Luis Miranda Dávalos (desde 2000) y otra situada en la explanada del Palacio de Congresos (desde 2009). La red histórica incluyó otras ubicaciones como la Avenida de Cádiz (1990–2005) o la Avenida de la Constitución (1994–2005). Las localizaciones actuales responden a criterios técnicos que buscan caracterizar la contaminación atmosférica en zonas urbanas representativas, actuando como estaciones de fondo para evaluar la exposición general de la población a los contaminantes. Ambas estaciones están situadas en puntos con vegetación y menor densidad de tráfico, lo que permite obtener mediciones representativas de la contaminación de fondo urbano. Sin embargo, algunos críticos vienen señalando que esta ubicación podría no reflejar adecuadamente los picos de contaminación en las vías más congestionadas. La Directiva 2008/50/CE y su transposición en España mediante el Real Decreto 102/2011 especifican que, en ciudades con pocos puntos de muestreo, al menos el 50 % de los puntos deben ser estaciones de tráfico si esta es la fuente principal de contaminación. En la actualidad Granada tiene dos estaciones de la RVCCA y aunque una de ellas esté calificada como de tráfico, se ha puesto

en duda que esta caracterización sea correcta por los bajos valores que muestra de forma sistemática.

Los instrumentos utilizados para medir las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en las estaciones de Granada son analizadores automáticos BAM. Estos equipos funcionan haciendo pasar una muestra de aire a través de una cinta filtrante que retiene las partículas; posteriormente, una fuente radiactiva de baja energía emite radiación beta que atraviesa el filtro, y la atenuación de esta radiación es directamente proporcional a la masa de partículas acumulada, lo que permite calcular la concentración con alta precisión. El muestreo se realiza mediante un sistema de captación que incluye un cabezal de entrada selectiva, diseñado para separar las partículas según su tamaño (PM_{10} o $PM_{2.5}$), y un tubo calefactado que conduce el aire hasta el interior del analizador, evitando que la humedad ambiental afecte a las mediciones. Los BAM están calibrados y homologados siguiendo estrictamente el método gravimétrico de referencia establecido en las normativas europeas (EN 12341 para PM_{10} y EN 14907 para $PM_{2.5}$), consistente en pesar manualmente los filtros en condiciones controladas de temperatura y humedad antes y después del muestreo. Las tomas de aire de los equipos están instaladas a una altura de entre 2 y 4 metros sobre el nivel del suelo, la denominada «zona de respiración», para garantizar que las mediciones sean representativas del aire que realmente respiran las personas.

Los datos se registran según la lógica de periodo finalizado y hora local, lo cual es importante para realizar comparaciones con otros conjuntos de datos como los de este proyecto, en los que las medidas se registran según la hora que da comienzo al periodo de medida y en tiempo universal coordinado.

La armonización de los datos de partículas medidos con los BAM con respecto a los datos obtenidos con el método gravimétrico de referencia en Europa (muestreo en filtro y pesaje en laboratorio) se realiza mediante la aplicación de factores de corrección por equivalencia. Para corregir la sobreestimación o subestimación de las medidas por parte de los BAM, se aplica una regresión lineal obtenida de campañas de intercomparación. Es decir, los valores brutos del BAM se multiplican por un coeficiente (la pendiente) y se les suma/resta una constante (la ordenada en el origen) para alinearlos con los pesos obtenidos por el método gravimétrico. Si la ordenada en el origen es muy pequeña (cercana a 0), se recalcula la pendiente para que absorba todo el ajuste. El Laboratorio de Referencia de Calidad del Aire (LARCA) es el encargado de supervisar estos protocolos y asegurar que los sistemas de evaluación cumplen con el Decreto 239/2011. Los datos disponibles en tiempo real han sido co-

regidos con los factores del año anterior. La armonización completa se realiza a posteriori para generar los Informes Anuales de Evaluación de la Calidad del Aire, donde los datos se consideran ya definitivos y plenamente comparables con los límites de la normativa vigente. Por ejemplo, los factores definitivos de 2025 están aún disponibles a principios de abril de 2026. Los datos aplicados en tiempo real en 2024 y hasta el 05/11 de 2025 eran los definitivos de 2023. Los nuevos factores aplicados en el tiempo real a partir del 05/11 de 2025 son los factores definitivos de 2024 (Tabla 2).

Tabla 2. Factores de corrección de los BAM de la RVCCA de la Junta de Andalucía en las dos estaciones de monitorización de la calidad del aire en Granada.

AÑO	GRANADA-NORTE		PALACIO DE CONGRESOS	
	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀
2023	0.82	1.09	1.22	1.09
2024	0.89	0.96	1.05	1.04

1.3.3. Calidad del aire según las medidas de la RVCCA

Las conclusiones extraídas de los informes oficiales de la Junta de Andalucía y el Ayuntamiento de Granada sobre la contaminación en la ciudad y su área metropolitana se centran en un análisis detallado de la Aglomeración de Granada (ES0118).

En cuanto a la evolución de las emisiones durante el periodo 2015–2021, los estudios reflejan una clara corrección estructural. Esta mejora es el resultado de la convergencia entre normativas de emisiones más restrictivas y una vigilancia administrativa rigurosa. El inventario de emisiones de este periodo revela variaciones significativas: una notable reducción del 40 % en los óxidos de nitrógeno (NO_x = NO + NO₂), un descenso moderado del 8 % en el PM₁₀ y una reducción del 11 % en PM_{2.5}. El único vector que muestra un incremento, del 2%, son los compuestos orgánicos volátiles (COV).

La auditoría identifica una clara especialización sectorial de la contaminación. El tráfico rodado se consolida como la fuente predominante de NO_x, siendo responsable del 52,2 % de la carga total. Por su parte, el Sector Residencial, Comercial e Institucional es el principal emisor de material particulado, tanto PM₁₀ como PM_{2.5}.

También se señalan aportaciones significativas de fuentes industriales específicas, como la industria del aceite, la fabricación de cementos, cales y yesos, y la industria química de fertilizantes. La reducción del 40 % en NO_x se atribuye directamente a la renovación tecnológica del parque móvil y a las políticas de gestión de la movilidad urbana, una mejora en la fuente emisora que se considera condición necesaria para reducir la reactividad química en la atmósfera baja y, por ende, mejorar los niveles de inmisión.

El análisis de las inmisiones, es decir, la concentración de contaminantes en el estrato respirable, se realiza a través de los datos de la RVCCA. La evolución de la calidad del aire en Granada ha seguido un patrón de descenso gradual con un estancamiento reciente. Entre 2001 y 2015, a pesar de un descenso sostenido, el NO₂ a menudo superaba el límite legal anual. En 2010, año de entrada en vigor del límite anual, la estación de Granada-Norte registró 47 µg/m³, superando los 40 µg/m³ permitidos. La tendencia a la baja muestra una reducción respecto a la década de 2000 gracias a la renovación del parque de vehículos. El descenso se mantiene hasta 2020 cuando el confinamiento por la pandemia hizo que se registrara el valor más bajo de la serie histórica. Desde entonces, Granada tiene dificultades para bajar de los 30 µg/m³. En términos legales las concentraciones de NO₂ se sitúan por debajo de los valores límite anuales establecidos por la legislación europea 2008/50/CE, aunque por encima de los próximos límites establecidos en la Directiva (UE) 2024/2881 y de las recomendaciones de la OMS. Según los datos más recientes, Granada está entre las ciudades españolas con peores registros de contaminación por NO₂, por detrás de grandes ciudades como Madrid y Barcelona (Casquero-Vera et al. 2019).

La evolución del ozono troposférico en la cuenca de Granada desde el año 2000 se define por una divergencia entre los valores de inmisión máxima y la concentración de fondo. El registro histórico muestra una reducción del 54 % en las superaciones del valor objetivo octohorario (120 mg/m³), atribuible a una contracción estructural en la emisión de precursores antropogénicos (NO_x y compuestos orgánicos volátiles) tanto a escala local como regional. Paralelamente, se observa un incremento en la línea base de este contaminante secundario debido a la menor densidad de emisión de monóxido de nitrógeno (NO) primario, que reduce el consumo de ozono en el microclima urbano, estabilizando sus niveles medios. Este fenómeno, condicionado por la estratificación térmica de la cuenca y el transporte advectivo de masas de aire preoxidadas, sitúa a Granada en 2025 en un escenario de limitación por precursores donde, pese a la mitigación de los picos agudos, la exposición crónica media permanece elevada.

Históricamente, Granada ha presentado niveles elevados de partículas, siendo 2007 un año especialmente crítico con 133 superaciones del valor límite diario en Granada Norte. Entre 2001 y 2025, la RVCCA ha registrado descensos significativos en los niveles medios anuales de materia particulada: prácticamente un 50 % tanto para PM_{10} como para el $PM_{2.5}$. No obstante, desde 2015 el descenso se ha estancado. Profundizando en el análisis factorial de contribución de fuentes y la identificación de puntos críticos o «hot spots», el análisis químico de los filtros gravimétricos en la estación de Granada Norte establece una jerarquía de fuentes para el PM_{10} . La principal contribución antropogénica proviene del tráfico rodado y fuentes regionales, que en conjunto suman un 43 %. Le sigue muy de cerca el material mineral resuspendido, que representa un 34 %. Completan el panorama las aportaciones antropogénicas locales, con un 10 % atribuido a una combinación de industria y doméstico, y un 11 % a otra combinación similar que incluye sectores como el del aceite, cerámica, cementos y fertilizantes. Las auditorías distinguen entre estaciones de fondo y puntos de máximo impacto. El valor de un «hot spot», como la Plaza del Triunfo, se obtiene técnicamente sumando el valor registrado en una cabina de la red (como Granada Norte o Paseos Universitarios) y el diferencial obtenido mediante modelos de dispersión del tráfico. Así, frente a una estación de fondo como Víznar, que registra $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , un *hot spot* puede llegar a los $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que evidencia el fuerte gradiente de concentración inducido por la proximidad al tráfico motorizado.

Ecologistas en Acción viene publicando informes sobre calidad del aire basados en los datos oficiales (<https://www.ecologistasenaccion.org/318060/>) que va actualizando de forma anual (<https://www.ecologistasenaccion.org/354860/las-principales-ciudades-superaron-en-2025-el-nuevo-limite-legal-de-contaminacion-por-dioxido-de-nitrogeno/>). Este colectivo viene incidiendo en la obsolescencia de los límites legales actuales y en que el cumplimiento de los nuevos límites va a requerir de la implantación de nuevas políticas de movilidad urbana, considerando el estancamiento de los niveles de los contaminantes críticos observado en el último lustro.

En el ámbito científico se han publicado varios artículos e informes en los que se analizan en profundidad las medidas de la RVCCA en Granada. Por ejemplo, el informe del IISTA-UGr (Casquero Vera et al. 2016) para el ayuntamiento de Granada concluía que los niveles de PM_{10} , NO_2 y O_3 en el periodo 2010–2015 superaron repetidamente los límites legales, si bien el número de superaciones de límites horarios o diarios permitidas al año solo ocurrió para PM_{10} en Granada Norte en 2010 y 2011. Entre los resultados de este análisis destaca el incumplimiento sistemático del límite anual de NO_2 . El análisis de las evoluciones anuales, mensuales y diurnas realizado en este

informe indica que el tráfico es la principal fuente de contaminantes en Granada, con contribuciones adicionales en el periodo invernal de las calefacciones domésticas y las quemaduras de biomasa en la Vega. El estudio también incluye un análisis de tendencias que muestran cómo los niveles de PM_{10} y NO_2 disminuyeron a lo largo del periodo 2000–2015, en consonancia con lo ocurrido en la mayoría de las ciudades europeas. Los autores concluían que esta mejora, que se ha extendido más allá de 2015 y ha resultado en promedios anuales de NO_2 inferiores al actual límite legal de $40 \mu g/m^3$, se debe principalmente a una combinación de normativas más estrictas sobre emisiones y avances tecnológicos en el transporte e industria.

1.3.4. Medidas de calidad del aire ajenas a la RVCCA en Granada

Desde la comunidad científica, el IISTA-UGr viene realizando investigaciones de distintos parámetros de calidad del aire usando su propia instrumentación. Estas medidas han dado lugar a abundante literatura científica en la que se han determinado las principales fuentes de materia particulada y NO_2 y su contribución relativa (Titos et al. 2014; Casquero-Vera et al. 2021; del Águila et al. 2018; Casquero-Vera et al. 2019) being partly associated to a reduction in anthropogenic activities due to the economic crisis. The use of fine and coarse PM in the PMF analysis allowed us for the identification of additional sources that could not be identified using only one size fraction. The mineral dust source was identified in both fractions and comprised 36 and 22 % of the total mass in the coarse and fine fractions, respectively. This high contribution of the mineral source to the fine fraction may be ascribed to contamination of the source profile. The regional re-circulation source was traced by secondary sulfate, V and Ni. It was the most important source concerning PM1 mass concentration (41 % of the total mass in this fraction).

El desarrollo de sensores de bajo coste también ha propiciado varios intentos de establecer redes de monitorización de la calidad del aire que permitan una mejor cobertura espacial que la que proporciona la RVCCA. Por ejemplo, la red Airly en Granada, gestionada por la Agencia Albaicín, fue un sistema de monitorización de la calidad del aire instalado en noviembre de 2020. La red estaba constituida por 8 dispositivos localizados en el *Palacio del Almirante*, la *Casa de Zafra*, el *Palacio de los Córdoba*, el *Carmen del Aljibe del Rey*, el *Centro Cultural la Chumbera*, el *Centro Cívico del Albaicín*, el *Centro García Lorca* y el *Cuarto Real de Santo Domingo*. Los sensores miden materia particulada, NO_2 , O_3 , SO_2 y CO, además de variables meteorológicas, aunque no existe información sobre los métodos de calibración.

Durante un tiempo se publicaron informes semanales en la web de la Agencia Albacín y los datos aparecían en el mapa de *Airly* (<https://airly.org/map/en/>), aunque actualmente no aparece activo en él ninguno de estos sensores. Los datos recogidos no son públicamente accesibles y no parece haberse publicado ningún informe describiendo los resultados.

Otro ejemplo es *CitySens Granada*, un proyecto desarrollado por Métrica6 para el Ayuntamiento de Granada con la financiación de los fondos EDUSI (<https://metrica6.xyz/es/portfolio/proyecto-de-instalacion-de-estaciones-de-monitoreo-permanente-de-la-calidad-del-aire-y-del-ruido-en-granada/>). En este proyecto se instalaron sensores de bajo coste de PM_{10} y NO_2 en distintos puntos de la ciudad. Los primeros ocho sensores (de los 300 anunciados) se instalaron en 2021, pero el proyecto fue abandonado (https://www.granadahoy.com/granada/pp-medidores-calidad-aire-Granada_0_1672333064.html). Los resultados estuvieron disponibles muy poco tiempo y en la actualidad no es posible acceder a ellos a través de la página web del Ayuntamiento de Granada.

Tanto *CitySens Granada* como *Airly Granada* parecen haber sido operaciones de escaparatismo político más que intentos serios de monitorización de la calidad del aire, habiendo ambos caído en el olvido y quedando los datos restringidos a informes parciales antiguos o uso interno, sin transparencia real para el público.

En cuanto a *5G CityBrain Granada*, se trata de un sistema de gestión urbana que combina un único sensor láser de emisiones reales en Méndez Núñez con una red de cámaras de lectura de matrículas para crear un modelo predictivo de contaminación. No se trata de un sistema que monitorice la calidad del aire, sino de una herramienta reactiva para el control y organización del tráfico. El modelo proporciona información detallada sobre la contribución específica de cada categoría de vehículo a la carga contaminante local. Esta información aporta la base científica necesaria para justificar legalmente las restricciones de acceso ante posibles impugnaciones judiciales a la Zona de Bajas Emisiones (ZBE), permite la modificación de ciclos semafóricos o la propuesta de itinerarios alternativos basados en la saturación de emisiones detectada en tiempo real y facilita la elaboración de planes de transporte público y carga y descarga ajustados al impacto ambiental medido. El sensor actúa como validador de campo para un modelo de simulación que se extiende al resto de la ciudad mediante visión artificial. Sin ese sensor, el sistema solo leería las etiquetas de la DGT; con él, el sistema aprende cuánto contaminan de verdad los coches en el contexto específico de Granada. Este sensor utiliza la técnica de espectroscopía de

absorción diferencial para medir en tiempo real las concentraciones de CO, CO₂, NO, NO₂ y la opacidad (partículas) de cada coche individual.

Aunque la fase de proyecto subvencionado terminó en diciembre de 2025, el Ayuntamiento de Granada está obligado por fondos europeos a mantenerlo operativo en 2026 como soporte técnico de la ZBE. La continuidad operativa del sensor dependerá de que el municipio asuma los costes de mantenimiento. Sin el sensor, el sistema pierde la capacidad de saber qué sale por el tubo de escape y el modelo pasaría a depender exclusivamente de la etiqueta de la DGT. En la práctica, el sistema se encuentra aún en la fase de recopilación de datos y entrenamiento del modelo. Aunque el proyecto contempla la regulación dinámica de la circulación, todavía no existe una gestión automatizada de los semáforos por parte de la inteligencia artificial. La Directiva (UE) 2024/2881 exige que, si una ciudad usa modelos para informar a la población, estos deben cumplir unos objetivos de calidad de modelización. Si el error es mayor del 50-60 % el modelo no se puede usar para activar protocolos oficiales de restricción de tráfico, quedando solo como una herramienta informativa interna.

1.4. Contexto socio-económico

La principal fuente de contaminación atmosférica en Granada es el tráfico rodado, causante de altas concentraciones de NO₂ y partículas, seguido por las calefacciones domésticas y la quema de residuos agrícolas. A pesar de la mejoría de parámetros de calidad del aire durante las dos últimas décadas, Granada sigue registrando niveles de contaminación por tráfico similares a los de grandes metrópolis como Madrid o Barcelona debido a su alta densidad de vehículos y desplazamientos desde el área metropolitana. La reducción del tráfico rodado viene apareciendo ya desde hace años como objetivo prioritario en los documentos estratégicos de la Junta de Andalucía (*Plan de Mejora de la Calidad del Aire de la Aglomeración de Granada* de 2013) y el Ayuntamiento de Granada (*Plan de Movilidad Urbana Sostenible* de 2012). En principio estos planes y sus recientes actualizaciones (nuevo plan de mejora de la calidad del aire en tramitación) y documentos complementarios (Ordenanza de la Zona de Bajas Emisiones, Plan de Transporte Metropolitano y otros) priorizan el transporte público, la bicicleta y el peatón sobre el coche privado según la llamada pirámide de la movilidad inversa, que obliga a invertir el orden de importancia del modo de desplazamiento en el diseño de la ciudad. La persistencia de una alta densidad de tráfico en Granada a pesar de las recientes intervenciones urbanísticas (peatonalizaciones, plataformas únicas, ampliación de aceras, carriles bici segregados, ZBE, etc) se explica por factores estructurales y de

planificación que limitan el impacto inmediato de las medidas de movilidad sostenible. La configuración de la aglomeración urbana, determinada en los últimos años por la falta de vivienda asequible y la subida de los alquileres debida entre otros factores al turismo masivo, genera una dependencia crítica del vehículo privado, ya que el trasvase de población hacia los municipios del cinturón metropolitano no ha ido acompañado de una red de transporte público con frecuencias y conexiones suficientes para absorber los desplazamientos pendulares diarios. Se da la circunstancia de que el diseño de la ZBE de Granada genera una brecha de desigualdad para los trabajadores del cinturón metropolitano con rentas bajas que dependen de vehículos antiguos para acceder a la ciudad, y que la introducción de excepciones para tratar de mitigar este impacto ha restado efectividad a la medida. Aunque se ha logrado reducir un 7,89 % el volumen de vehículos sin etiqueta (categoría A) procedentes de fuera de la ciudad, el número total de desplazamientos motorizados en el núcleo urbano se mantiene en niveles muy similares a los de años anteriores. Desde la entrada en vigor de la ZBE los datos de calidad del aire no evidencian un cambio significativo en los niveles de NO₂ y partículas.

Las Vías de Aglomeración Urbana (VAU) representan una de las principales contradicciones estratégicas en la planificación territorial de Granada al confrontar dos modelos de movilidad opuestos. Mientras que los planes de calidad del aire y la ZBE se fundamentan en la reducción del parque móvil circulante, las VAUs proyectadas originalmente en el Plan de Ordenación del Territorio de la Aglomeración Urbana de Granada (POTAUG) responden a un modelo de incremento de la capacidad viaria. La llamada paradoja del tráfico inducido señala que la creación de nuevas infraestructuras de alta capacidad no mitiga la congestión a largo plazo sino que incentiva el uso del vehículo privado al reducir los tiempos de viaje iniciales, lo que contraviene el objetivo de transferencia modal hacia el transporte público. Existe un conflicto normativo y una disonancia entre la inversión en infraestructuras que facilitan el acceso motorizado a la capital y las directrices de la Ley de Cambio Climático y Transición Energética que obliga a las ciudades de más de 50.000 habitantes a establecer medidas restrictivas de disuasión del tráfico. Para intentar dotar de coherencia a estos proyectos con la estrategia 2024-2026 la administración autonómica ha planteado el rediseño de algunas VAUs como *vías parque*, convirtiéndolas en corredores multimodales que incorporen plataformas reservadas para autobuses y trazados ciclistas tratando de mitigar su impacto como meras autovías de acceso. Sin embargo, estas vías suponen un impacto en la Vega de Granada y una presión urbanística sobre suelos agrícolas de alto valor cuya protección es también un objetivo nominal de los planes de sostenibilidad vigentes, generando un conflicto de intereses entre el desarrollo de infraestructuras y la preservación del ecosistema local.





02. Justificación y objetivos

La polución atmosférica es un problema de salud pública de primer orden. Investigaciones recientes revelan que el 98 % de la población europea vive en zonas con contaminación de partículas finas ($PM_{2.5}$) que supera los niveles recomendados por la OMS. En España, la mitad de la población está expuesta al doble de estos niveles. Se estima que la exposición a $PM_{2.5}$ causa aproximadamente 400.000 muertes al año en Europa. El tráfico, la industria, las calefacciones y la agricultura son las principales fuentes de $PM_{2.5}$ y el impacto a menudo es desproporcionadamente mayor en las comunidades con menos recursos. Considerando la gravedad del problema, muchas ciudades europeas están realizando esfuerzos para reducir la polución atmosférica, especialmente mediante la introducción de medidas de movilidad sostenible y el fortalecimiento de la infraestructura verde. Estas medidas se insertan además en estrategias de lucha contra el cambio climático desde el punto de vista tanto de la mitigación como de la adaptación. Sin embargo, los expertos indican que desde la política debe actuarse con más urgencia considerando la creciente evidencia científica del daño que produce la polución atmosférica en la salud de las personas. Es esencial que la ciudadanía exija a sus representantes medidas en este sentido, y para ello debe estar concienciada de la gravedad del problema, de las causas y efectos cruzados del cambio climático y la polución y de las posibles soluciones a mano de las distintas administraciones públicas. En este sentido, los proyectos de ciencia ciudadana en Europa están desempeñando un papel cada vez más importante tanto en la adquisición de datos a gran escala como en la concienciación y participación de la ciudadanía. Para la realización de este tipo de proyectos es posible recurrir a sensores como los contadores de partículas mediante dispersión de luz láser, que por su coste reducido, pequeño tamaño, fácil manejo y gran sensibilidad pueden facilitar a un grupo de voluntarios/científicos ciudadanos la monitorización espacio-temporal de la contaminación en grandes áreas urbanas.

Los objetivos científicos del proyecto de voluntariado y ciencia ciudadana «Ciudades Respirables-Ciudades Sostenibles» son:

1. Desarrollar en Granada una pequeña infraestructura de detectores fijos y portátiles de materia particulada en suspensión y validarla mediante métodos de medida de referencia.

2. Obtener medidas de calidad del aire con gran resolución espacial y temporal de forma independiente a la RVCCA.
3. Identificar y estudiar los puntos calientes de contaminación presentes a escala urbana y comprobar si el diseño de la RVCCA es suficiente o requiere mejoras.

Una vez alcanzados estos objetivos el proyecto pretende reflexionar sobre la suficiencia de las medidas adoptadas por las administraciones, informar a la sociedad granadina y proponer medidas.





03. Metodología

3.1. Sensores

Sensor.community (<https://sensor.community/>) es una red global de ciencia ciudadana que permite a los participantes construir equipos de bajo coste para medir la calidad del aire. Los datos recopilados se comparten en tiempo real como datos abiertos en un mapa interactivo, fomentando la monitorización comunitaria del medio ambiente. El proyecto Ciudades Respirables-Ciudades Sostenibles hace uso de esta red, para lo que dispone de diez equipos de medida, tres de los cuales comparan los datos en ella de forma continua.



Figura 1. Configuración estática del equipo: **(a)** Kit con todos los accesorios necesarios **(b)** Sensor SDS (izquierda), sensor BME (centro, a la derecha de las dos bridas) y tarjeta NodeMCU (derecha). **(c)** Dispositivo ensamblado. **(d)** Dispositivo en su ubicación actual en el Instituto de Astrofísica. Se requiere una conexión WiFi y un enchufe cercano.

Los equipos de medida de calidad del aire de *sensor.community* constan de una tarjeta NodeMCU, un sensor SDS011 de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ y un sensor BME280 de variables ambientales (temperatura, humedad y presión) (<https://sensor.community/en/sensors/airrohr/>). NodeMCU es una plataforma de desarrollo de código abierto diseñada específicamente para proyectos del «Internet de las Cosas» (*Internet of Things*, IoT). Combina hardware y software para permitir que dispositivos se conecten a internet de forma sencilla y económica. La placa de desarrollo se basa en el chip ESP8266 (*Espressif Systems*) e incluye una antena Wi-Fi integrada, un puerto micro-USB para alimentación y programación, y conexiones para sensores o actuadores. Su compatibilidad con el entorno de desarrollo de Arduino permite programar el firmware usando C++. Es posible adquirir un kit con todos los componentes, que incluye un adaptador y un cable USB de alimentación y dos codos de tubería de PVC que permiten construir una carcasa para proteger de forma económica y efectiva los componentes electrónicos de la exposición al exterior (**Figura 1**). El coste total del kit es de unos 70 €.

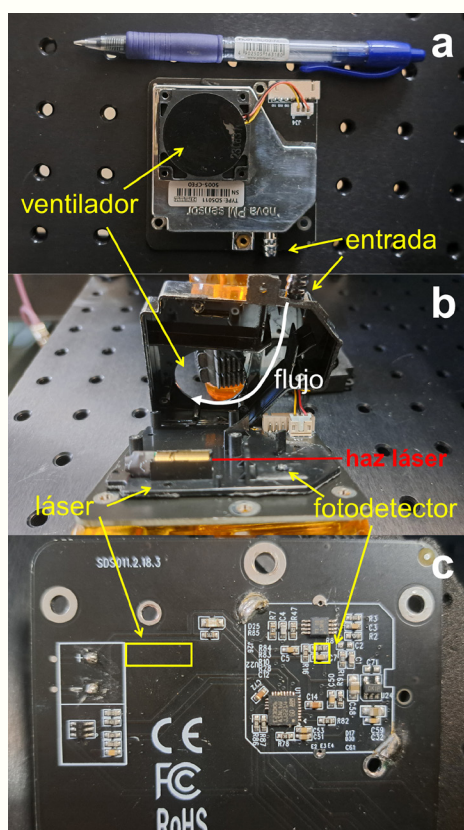


Figura 2. Sensor SDS011. (a) Sensor completo. (b) Interior del sensor, donde se indican la dirección del flujo generado por el ventilador desde la entrada y la posición del haz láser con respecto al campo de visión del fotodetector (90°), (c) Anverso de la placa base, donde se indican las posiciones en el reverso del láser y el fotodiodo.

El sensor Bosch BME280 mide la presión, temperatura y humedad utilizando tecnología de sistemas microelectromecánicos, que integra componentes mecánicos y electrónicos en un pequeño chip. Cada medición se basa en un principio físico específico, y las lecturas se compensan internamente mediante algoritmos para asegurar precisión. El sensor utiliza un termistor NTC (coeficiente de temperatura negativo) integrado para medir la temperatura. El principio de funcionamiento se basa en la característica de que la resistencia del termistor cambia de manera predecible con la temperatura ambiente. Esta lectura se usa también para compensar las mediciones de presión y humedad. La medición de humedad se logra mediante un sensor capacitivo, consistente en dos conductores eléctricos con una película de polímero no conductora entre ellos. Al acumularse la humedad del aire en esta película, cambia su constante dieléctrica y, por lo tanto, los niveles de voltaje del campo eléctrico entre las placas. Este cambio se convierte en una medición de la humedad relativa. Por último, la presión se mide utilizando un sensor de presión capacitivo que incluye una membrana sensible a la presión. Los cambios en la presión atmosférica hacen que la membrana se deforme. Sensores piezorresistivos o capacitivos detectan esta deformación, generando un voltaje proporcional a la presión ambiente.

3.1.1 Técnica de medida de partículas

El sensor SDS011 (Nova Fitness) (http://en.novasensor.cn/?list_16/55.html) es un sensor de calidad del aire basado en la dispersión láser que mide con gran sensibilidad las concentraciones de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Es ampliamente utilizado en proyectos de calidad del aire de bajo costo debido a su robustez, precisión y facilidad de integración con plataformas como Arduino y PC. En el SDS011, un ventilador interno aspira aire a través de un tubo, un láser de diodo incide sobre las partículas, y un fotoreceptor convierte la luz dispersada en un ángulo de 90° en señales eléctricas (Figura 2), calculando el tamaño y cantidad de material particulado a partir de estas según una calibración interna. Los parámetros técnicos proporcionados por el fabricante se incluyen en la Tabla 3. Para obtener un valor de concentración másica (masa de partículas por unidad de volumen de aire) en $\mu g/m^3$ (microgramos por metro cúbico), el sensor realiza los siguientes pasos:

- (i) Convierte la altura del pulso de señal producido por la interacción del láser con cada partícula en el tamaño de esa partícula, según una calibración de laboratorio realizada por el fabricante con partículas bien caracterizadas (habitualmente esferas de látex).

- (ii) Va asignado el número de pulsos que corresponden a cada tamaño de partícula (un diámetro asumiendo que las partículas reales también fueran esféricas).
- (iii) Asume que las partículas son esféricas para obtener el volumen y convierte el volumen en masa usando una densidad genérica de partícula.
- (iv) Suma la masa de todas partículas en un rango determinado ($PM_{2.5}$) y divide por el volumen de aire que pasa a través del dispositivo según las características del flujo creado por el ventilador.
- (v) Utiliza una segunda calibración (calibración de campo o de factor de masa) para corregir los efectos que puede tener de la densidad, forma y composición de las partículas de calibración en la estimación de la masa de aerosol real en un determinado ambiente. Esta calibración, de la cual el fabricante no informa, procede posiblemente de una comparación en distintos ambientes con dispositivos de gama superior.

Tabla 3. *Parámetros técnicos del sensor SDS011 según el fabricante (http://en.novasensor.cn/?list_16/55.html).*

PARÁMETRO	VALOR
Rango	0.0–999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Voltaje operacional	5V
Corriente operacional	(70 $\pm$ 10) mA
Corriente en apagado	< 4 mA
Rango de temperatura de almacenamiento	-20 °C – 60 °C
Rango de temperatura de operación	-10 °C – 50 °C
Rango de humedad de almacenamiento	< 90%
Rango de humedad de operación	< 70%
Presión atmosférica	86 kPa – 110 kPa
Resolución mínima de tamaño	0.3 μm
Eficiencia de conteo	70 % @ 0.3 μm ; 98 % @ 0.5 μm
Error relativo @ 25 °C, 50 % HR	Máximo de 15 % y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Tamaño del sensor	71 × 70 × 23 mm
Certificación	CE/FCC/RoHS

La inconsistencia del SDS011 cuando cambia la morfología del aerosol es conocida (Hagan and Kroll 2020), lo que indica que la calibración de factor de masa codificada en el firmware SDS011 no es universal. Existen factores adicionales que pueden falsear las medidas:

- a). El sensor detecta con mucha menor eficiencia partículas entre 2.5 y 10 micras y por tanto deriva la medida de PM_{10} a partir de un modelo o calibración interna desconocida, basada en la medida de $PM_{2.5}$ (el software es propietario, por ello funciona como caja negra). Por tanto, la medida de PM_{10} no es independiente (Laquai 2017).
- b). Existen limitaciones mecánicas para succionar partículas de mayor tamaño: esto provoca que, en épocas secas, el sensor no logra capturar la fracción más pesada del aire.
- c). En alta humedad (humedad superior al 75–80%), determinadas partículas tienen la propiedad de captar agua con facilidad (son higroscópicas), lo que causa un aumento de tamaño, haciendo que el SDS011 sobreestime la masa de materia seca al medir un diámetro mayor que el real (Badura et al. 2018)such sensors should be calibrated under conditions close to the final ones before any monitoring actions. The paper presents the results of a collocated comparison of four models of low-cost optical sensors with a TEOM 1400a analyser. SDS011 (Nova Fitness. Los parámetros técnicos proporcionados por el fabricante (Tabla 3) indican que la máxima humedad relativa bajo la que puede operar el sensor es del 70%.

Diversos estudios comparativos han determinado que los sensores ópticos en general (Jiao et al. 2016; Hagan and Kroll 2020) y el sensor SDS011 en particular (Budde et al. 2018; Bulot et al. 2019)2,11]],»issued»:{{«date-parts»:{{[[«2018»,12,14]]}}},{{«id»:7227,»uris»:{{«http://zotero.org/users/11545299/items/D7M8Q93W»}},»itemData»:{{«id»:7227,»type»:»article-journal»,»abstract»:»Exposure to ambient particulate matter (PM presentan sesgos importantes con respecto a las técnicas de medida directa de masa. Se trata de un dispositivo que puede informar sobre tendencias gracias a su excelente sensibilidad, pero que, por sí solo, no puede ofrecer información fiable sobre concentraciones absolutas. Para medir concentraciones absolutas con la exactitud necesaria —ya sea para verificar el cumplimiento de estándares legales o para realizar estudios epidemiológicos con umbrales de salud precisos—, se requieren instrumentos de medida gravimétrica directa, sin intermediación óptica. Estos instrumentos, integrados en redes de monitorización oficiales como la RVCCA de Andalucía, son mucho

más voluminosos y pesados, consumen más energía y su coste es muy superior al de los sensores ópticos de bajo coste. No obstante, es posible calibrar periódicamente los sensores SDS011 contra uno de estos dispositivos de referencia. Este procedimiento convierte al sensor en una herramienta validada, permitiendo ampliar la monitorización a múltiples localizaciones con un equilibrio aceptable entre coste y fiabilidad.

3.1.2. Calibración y seguimiento de deriva

El uso de sensores láser como el SDS011 permite una monitorización de la calidad del aire de alta frecuencia y duración. Sin embargo, en comparaciones directas con equipos certificados, el SDS011 tiende a medir concentraciones distintas, que pueden ser mayores o menores dependiendo de la naturaleza del aerosol y las condiciones meteorológicas locales (especialmente humedad). Esta discrepancia no implica un mal funcionamiento, sino que responde a limitaciones propias de la tecnología de medición de partículas con métodos ópticos mencionadas más arriba, combinadas con la falta de trazabilidad de las calibraciones insertadas en el firmware cerrado de los detectores.

Por tanto, los sensores SDS011 por sí solos no pueden sustituir a las estaciones de referencia para el cumplimiento de límites legales, aunque sí son excelentes para identificar tendencias y focos calientes de contaminación en tiempo real. Pero los datos de estos sensores pueden ser también útiles para complementar o verificar la suficiencia de una red de calidad del aire si se corrigen mediante una calibración local frente a un equipo certificado. En nuestro estudio hemos optado por realizar calibraciones in situ utilizando como referencia las medidas de la unidad móvil del IISTA. Se trata de una furgoneta climatizada equipada con instrumentación científica para medir distintos parámetros de calidad del aire y meteorológicos. El IISTA monitoriza la calidad del aire de la ciudad con este sistema en localizaciones en las que hay acceso a corriente eléctrica. A lo largo de 2024 y 2025 la unidad móvil ha estado midiendo en las propias instalaciones del IISTA, la Facultad de Ciencias-UGr, la Facultad de Bellas Artes-UGr, la Biblioteca Biosanitaria-UGr y el Parque Federico García Lorca. Entre otros instrumentos, la unidad móvil está equipada con una microbalanza de elemento oscilante o TEOM. Este instrumento se usa para medir en tiempo real la concentración másica de partículas de aerosol. Consta de un pequeño tubo de vidrio en vibración cuya frecuencia de oscilación cambia cuando las partículas de aerosol se depositan sobre él, aumentando su inercia. Con esta técnica se pueden medir $PM_{2.5}$ y PM_{10} , aunque el instrumento de la unidad móvil del IISTA sólo tiene

capacidad de medir PM_{10} . El TEOM está reconocido como un método de medición equivalente para la calidad del aire según la Directiva 2008/50/CE de la Unión Europea. El IISTA dispone además de un sistema de medida por gravimetría, que consiste en la medición directa del aumento de masa de un filtro que ha capturado el aerosol. Este es el método de referencia oficial para la medición de la concentración másica de material particulado en aire ambiente con el cual se comparan todos los otros métodos, y que en este caso se utiliza para validar los datos del TEOM. Además el IISTA realiza calibraciones externas mensuales del instrumento.

Para realizar las calibraciones los sensores SDS011 frente al TEOM, estos se situaron en el techo de la unidad móvil (**Figura 3**), con las entradas de aire situadas a la misma altura aproximadamente que la toma de aire del TEOM.

Debido a que la exactitud de los sensores ópticos puede variar significativamente a lo largo del año por cambios en el tipo de partículas dominantes y las condiciones de humedad (Hagan and Kroll 2020), es necesario realizar calibraciones con cierta frecuencia. Granada está expuesta a distintas fuentes de aerosol y además experimenta frecuentes intrusiones de polvo sahariano (Titos et al. 2014, 2017). Por ello se han realizado varias calibraciones in situ de los sensores SDS011 en la unidad móvil del IISTA a lo largo de la duración de este estudio. Dado que el TEOM del IISTA solo mide PM_{10} , se han realizado dos comparativas adicionales in situ con los datos de $PM_{2.5}$ y PM_{10} de las dos estaciones de la RVCCA en Granada (Granada-Norte y Palacio de Congresos) (**Figura 4**). Estas estaciones están equipadas con sistemas de monitorización por atenuación de haz (BAM), como hemos indicado más arriba.

Granada, además, tiene un fuerte ciclo estacional de humedad, y durante los periodos de humedad relativa (HR) elevada se observa crecimiento higroscópico de los aerosoles. La dependencia de las medidas de PM_{10} con la humedad se ha parametrizado usando los datos de humedad relativa (Crilley et al. 2018) for these low-cost sensors to be useful for these types of studies their accuracy and precision need to be quantified. We evaluated the Alphasense OPC-N2, a promising low-cost miniature optical particle counter, for monitoring ambient airborne particles at typical urban background sites in the UK. The precision of the OPC-N2 was assessed by co-locating 14 instruments at a site to investigate the variation in measured concentrations. Comparison to two different reference optical particle counters as well as a TEOM-FDMS enabled the accuracy of the OPC-N2 to be evaluated. Comparison of the OPC-N2 to the reference optical instruments shows some limitations for measuring mass concentrations of PM_1 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} . The OPC-N2 demonstrated a

significant positive artefact in measured particle mass during times of high ambient RH ($>85\%$) medidos por la estación meteorológica de la unidad móvil. A la aplicación de esta parametrización a los datos medidos por los sensores fijos también requiere asegurarse de que las medidas de HR de los sensores BME280 son fiables, por lo cual también se han determinado factores de corrección de estas durante los períodos de comparación in situ en la unidad móvil del IISTA.

Adicionalmente, se han realizado comparaciones ex situ frecuentes con las medidas de PM_{10} y HR de la unidad móvil del IISTA con el objetivo de hacer un seguimiento más exhaustivo de la evolución temporal de los factores de calibración.



Figura 3. Calibración de los sensores en la unidad móvil del IISTA durante su estancia en la Biblioteca Biosanitaria-PTS (noviembre 2024).



Figura 4. Calibración de sensores en la estación de monitorización de calidad del aire de la RVCCA de la Junta de Andalucía junto al Palacio de Congresos (febrero 2024).

3.1.3. Estatus legal de los sensores de bajo coste

Un sensor de bajo coste como el SDS011 no tiene validez alguna para vigilar el cumplimiento de los límites legales establecidos en el Real Decreto 102/2011. La razón técnica y jurídica es que este tipo de sensores no cumple con los requisitos de certificación de la norma UNE-EN 16450 y por ello no pueden garantizar la equivalencia con el método gravimétrico. Por un lado, la normativa exige que la incertidumbre de la medición sea inferior al 25 %, mientras que los sensores de bajo coste pueden presentar desviaciones muy superiores, especialmente ante variaciones de humedad o cambios en la composición química del polvo. Por otro lado, el principio de medida (dispersión

de luz láser) es, como se ha visto más arriba, indirecto. La masa es estimada a partir del tamaño de las partículas usando un valor promedio de la densidad de estas. Si la densidad del polvo cambia (por ejemplo, si hay intrusión de polvo sahariano frente a tráfico urbano), el sensor da un dato erróneo si no se calibra físicamente.

En este proyecto demostraremos que es técnicamente posible realizar una corrección del efecto de la humedad y realizar calibraciones frecuentes para tener en cuenta los cambios en la naturaleza de las partículas o la degradación del sensor. Sin embargo, las medidas del SDS011 siguen siendo jurídicamente insuficientes para el cumplimiento legal. De acuerdo con el Real Decreto 102/2011 y la norma UNE-EN 16450, la validez jurídica de una medición automática de partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ depende de una cadena de trazabilidad íntegra que los sensores de bajo coste no pueden garantizar. Esta trazabilidad se sustenta en tres pilares técnicos: el control del caudal volumétrico, que debe ser exacto y estar calibrado frente a patrones de flujo nacionales; la determinación de la masa, que en equipos oficiales se vincula a patrones físicos como láminas certificadas o constantes elásticas verificadas, a diferencia de la estimación algorítmica de los sensores ópticos; y la certificación de examen de tipo, que acredita documentalmente que el modelo cumple los objetivos de calidad de datos de la Unión Europea. Sin la concurrencia de estos factores metrológicos, cualquier dato obtenido, por muy calibrado que esté frente a una estación de referencia, carece de trazabilidad oficial y se clasifica legalmente como una medición indicativa sin carácter vinculante ante la administración o los tribunales.

Sin embargo, la Directiva (UE) 2024/2881 contempla el uso de dispositivos de bajo coste en la categoría específica de mediciones indicativas, diferenciándose estrictamente de las mediciones fijas de referencia. Esta normativa establece objetivos de calidad de los datos, permitiendo una incertidumbre expandida (2 sigma) máxima del 50 % para las mediciones indicativas, frente al 25 % exigido para las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ en estaciones oficiales. Pese a su utilidad para el mapeo con alta resolución espacial y la identificación de focos de emisión, estos dispositivos no pueden utilizarse de forma aislada para certificar el cumplimiento de los valores límite legales, quedando su función supeditada al apoyo de las redes oficiales para completar lagunas de información. En consecuencia, la directiva reconoce su valor para la concienciación ciudadana y la planificación preventiva, pero mantiene la exclusividad del método gravimétrico y los equipos equivalentes certificados para cualquier procedimiento con trascendencia jurídica.

Es importante señalar que si bien las medidas indicativas no tienen validez legal frente a las medidas de referencia o las equivalentes, si pueden utilizarse como evidencia

científica, complemento de la modelización o incluso prueba pericial. Los colectivos ciudadanos pueden apoyarse en medidas indicativas para cuestionar la ubicación o suficiencia de la red oficial por vía administrativa o judicial. Durante la elaboración de los planes de mejora de la calidad del aire (obligatorios por el Real Decreto 239/2011), presentar un informe de medidas indicativas debería obligar a la administración a dar una respuesta técnica motivada en el trámite de alegaciones. Si la administración ignora las peticiones, se puede interponer un recurso ante los tribunales.

La especificación técnica CEN/TS 17660-2:2024 es el estándar europeo diseñado específicamente para evaluar las prestaciones de los sensores de calidad del aire destinados a la medición indicativa de material particulado. Esta norma establece los requisitos mínimos para que un sensor pueda ser clasificado legalmente como de medición indicativa bajo la Directiva (UE) 2024/2881, exigiendo protocolos de ensayo en cámaras de exposición y pruebas de campo de larga duración. En este marco normativo, el sensor SDS011 no dispone de una certificación de cumplimiento. El principal impedimento radica en la gestión de la humedad, ya que la norma exige que el sistema minimice la interferencia por higroscopia para evitar la sobreestimación de masa, algo que este sensor no logra sin sistemas de secado adicionales. Así mismo, la normativa requiere demostrar una estabilidad y deriva temporal controladas, mientras que el SDS011 presenta una degradación mecánica y óptica prematura en condiciones de uso continuo en exteriores. Finalmente, al tratarse de un componente de bajo coste, carece de los ensayos de certificación oficiales que validen su precisión frente a diversos aerosoles, quedando su uso limitado a proyectos informativos sin alcanzar el estatus legal de medición indicativa. No obstante, sigue siendo posible realizar una validación post-hoc de este tipo de sensores mediante un protocolo de calibración, la corrección de los sesgos conocidos y una cuantificación de la incertidumbre, con la idea de disponer de un conjunto de datos técnicamente válidos.

3.2. Sensores

3.2.1. Medidas fijas

3.2.1.1. Localizaciones

Hay dos sensores adquiriendo datos en localizaciones fijas desde marzo de 2024. Uno está instalado en el Instituto de Astrofísica de Andalucía (Camino Bajo de Huétor 59B, 18008). El sensor está registrado en <https://sensor.community/es/> (en el mapa,

hacer zoom en Granada). Las series temporales de datos crudos (no calibrados) están disponibles en:



<https://api-rrd.madavi.de:3000/grafana/d/GUaL5aZMz/pm-sensors?var-chipID=esp8266-10599713&orgId=1&from=now-6h&to=now&timezone=browser&var-type=BME280&var-query0=sensors> (hasta junio 2025).



<https://api-rrd.madavi.de:3000/grafana/d/GUaL5aZMz/pm-sensors?orgId=1&theme=light&var-chipID=esp8266-11639437&var-type=BME280&var-query0=sensors&from=now-24h&to=now&timezone=browser> (desde junio 2025).

El segundo sensor, desde marzo de 2024, está en la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación (ETSIIT) de la Universidad de Granada (UGr) (Calle Periodista Daniel Saucedo Aranda S/N, 18004). El sensor está registrado en <https://sensor.community/es/>. La serie temporal de datos crudos (no calibrados) está disponible en:



<https://api-rrd.madavi.de:3000/grafana/d/GUaL5aZMz/pm-sensors?orgId=1&theme=light&var-chipID=esp8266-1528999&var-type=BME280&var-query0=sensors&from=now-24h&to=now&timezone=browser>.

En marzo de 2025 se instaló un tercer sensor fijo en el CEIP Cristo de la Yedra (Paseo de Cartuja 2, 18011). La serie temporal de datos crudos (no calibrados) está disponible en:



<https://api-rrd.madavi.de:3000/grafana/d/GUaL5aZMz/pm-sensors?orgId=1&theme=light&var-chipID=esp8266-1747938&var-type=BME280&var-query0=sensors&from=now-24h&to=now&timezone=browser>.

Desde octubre de 2025 hay datos disponibles de un cuarto sensor fijo perteneciente a la asociación Realejo Habitable, situado en la Calle Molinos 52 (18009). El sensor está registrado en <https://sensor.community/es/>. La serie temporal de datos crudos (no calibrados) está disponible en:



<https://api-rrd.madavi.de:3000/grafana/d/GUaL5aZMz/pm-sensors?var-chipID=esp8266-10655971&orgId=1&from=now-24h&to=now&timezone=browser&var-type=SDS011&var-query0=sensors>.

Así mismo se han hecho campañas cortas con sensores fijos en la Fuente de las Batallas (18009), durante la feria del Libro en abril de 2024, y en el IES La Madraza (Plaza Escritor Fernández Castro 2, 18014), durante una actividad de divulgación en diciembre de 2024 (<https://ciudadesrespirables.andaluciacienciaciudadana.es/blog/visita-al-ies-la-madraza/>).

Las localizaciones de los puntos de medida (Tabla 3) pueden caracterizarse según la clasificación de las estaciones de calidad del aire en España (y por tanto, en la red de la Junta de Andalucía), que se rige por una normativa europea transpuesta en el Real Decreto 102/2011.

Los sensores están colocados entre 3 y 5 metros por encima del nivel de calle (Figura 1).

Tabla 4. Caracterización de los puntos de medida y estaciones de la RVCCA más cercanas a estos (las dos estaciones en la capital granadina se consideran urbanas de fondo).

PUNTOS DE MEDIDA	CLASIFICACIÓN	ESTACIÓN MÁS CERCANA DE LA RVCCA
IAA-CSIC (calle)	Urbana de tráfico	Palacio de Congresos
ETSIIT-UGr (patio de acceso)	Urbana de fondo	Granada-Norte
Colegio Cristo de la Yedra (patio)	Urbana de fondo	Granada-Norte
Calle Molinos (calle)	Urbana de tráfico	Palacio de Congresos
Fuente de las Batallas (calle)	Urbana de tráfico	Palacio de Congresos
IES la Madraza (patio)	Urbana de fondo	Granada-Norte

Para el análisis de patrones temporales y promedios diarios y anuales sólo se considerarán las tres series con al menos un año de duración (IAA-CSIC, ETSIIT-UGr y Cristo de la Yedra).

3.2.1.2. Adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos

La plataforma NodeMCU a la que van conectados los sensores SDS011 y BME280 dispone de una conexión WiFi que permite enviar datos de forma automática a un servidor remoto de la red *sensor.community* a través de interfaces de programación de aplicaciones (*application programming interface*, API). En este caso el firmware permite enviar los datos a *sensor.community*, donde se visualizan como valores

instantáneos en un mapa (**Figura 5a**) , y a *madavi.de*, donde se visualizan las series temporales (**Figura 5b**) (ver los enlaces en la sección anterior). Los datos (fecha-hora, $PM_{2.5}$, PM_{10} , temperatura, presión, humedad, señal WiFi) recibidos por *madavi.de* son interpolados a un eje temporal predefinido con resolución de unos 3 minutos y almacenados. Las series temporales pueden descargarse con distintas resoluciones temporales desde esta plataforma.

Una vez descargados los datos en un PC se analizan con un software estadístico. Es necesario reducir la resolución temporal de las medidas para analizarlas y comparlas con las medidas de la RVCCA y los umbrales establecidos en la legislación. En el caso de medidas de calibración, se obtienen series de promedios de 10 minutos para comparar con las medidas del TEOM del IISTA o de los BAM de la RVCCA. En el caso de las medidas de los sensores en las localizaciones fijas, se calculan los promedios diez-minutales, se aplican los factores de calibración correspondientes y a partir de los datos ya corregidos se calculan series horarias, diarias y mensuales, perfiles promedio diarios y estacionales y promedios anuales.

La eliminación de los periodos de intrusión de polvo sahariano es un proceso normativo que permite descontar las superaciones de los valores límite de PM_{10} y $PM_{2.5}$ cuando estas son atribuibles a fuentes naturales. Este procedimiento es fundamental para que las administraciones no sean penalizadas por niveles de contaminación que están fuera de su control antropogénico. La posibilidad de realizar estos descuentos está regulada por la Directiva (UE) 2008/50 (Art. 20), que establece que los Estados miembros pueden deducir las aportaciones de fuentes naturales (como el polvo africano o el aerosol marino) al evaluar el cumplimiento de los valores límite. Esta directiva europea está traspuesta al Real Decreto 102/2011 (España), donde se definen los objetivos de calidad del aire para la protección de la salud.

SENSOR.COMMUNITY

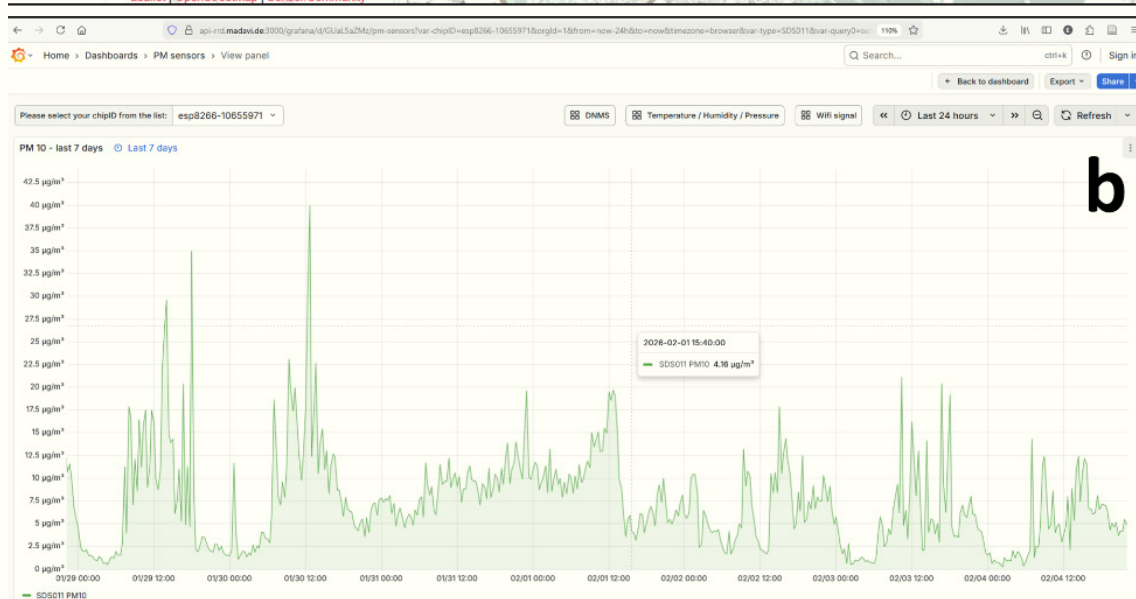
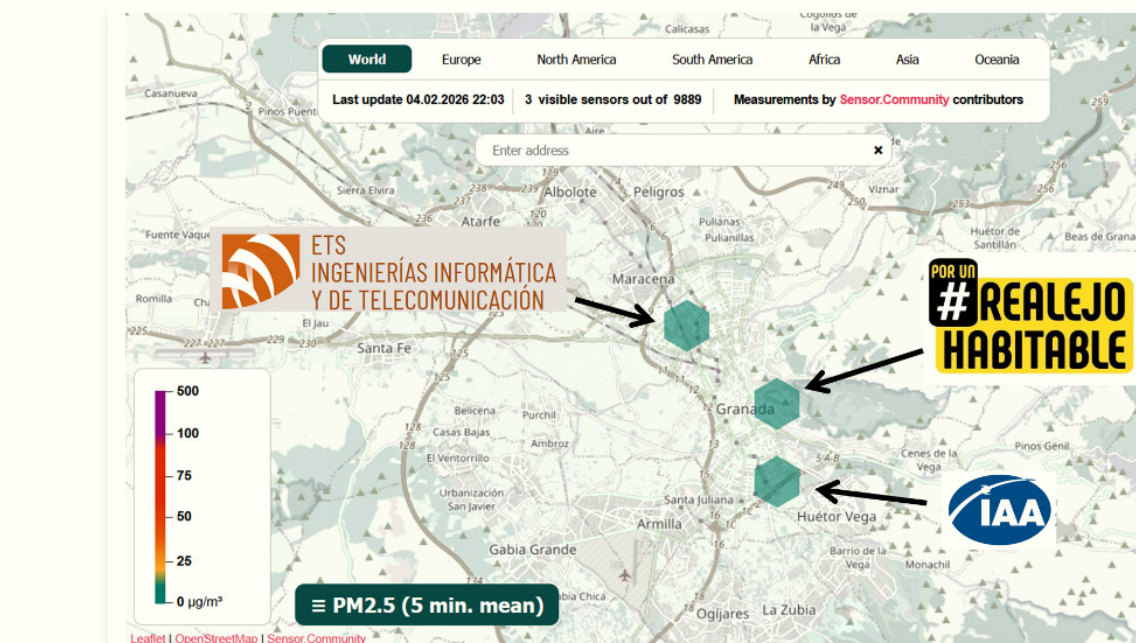
HOME

GUIDES

FORUM

DONATE ❤️

a



b

Figura 5. Interfaces de la red sensor.community. (a) Mapa con la localización de sensores, donde el color de los símbolos indica la magnitud de la medida de $PM_{2.5}$. El sensor situado en el Colegio Cristo de la Yedra no estaba enviando datos en ese momento y por ello no aparece su ubicación en el mapa (b) Visualización semanal de la serie temporal de PM_{10} en el IAA-CSIC.

3.2.1.3. Eliminación de los datos obtenidos durante eventos de intrusión de polvo sahariano

Para eliminar los efectos de estas intrusiones sobre los datos, las redes de medida de calidad del aire emplean una metodología oficial validada por la Comisión Europea (Directiva 2008/50/CE):

1. Identificación del episodio: Se utilizan modelos meteorológicos y herramientas de teledetección (como los proporcionados por el CAMS) para confirmar que la masa de aire procede del Sahara.
2. Cálculo de la aportación natural: Se estima qué parte de la concentración diaria de partículas se debe al polvo natural. Generalmente, se utiliza el método de los percentiles o la comparación con estaciones de fondo que no sufren contaminación local.
3. Sustracción de datos: Se resta la contribución natural (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) del valor total registrado por la estación de medición.

Para identificar episodios de calima, se han buscado períodos en los que se dan valores altos de PM_{10} de forma generalizada (todas las estaciones de la ciudad) a otras horas distintas de las del tráfico principal. Esa información se combina con las propiedades ópticas del aerosol medidos en el IISTA (dispersión y absorción) y con información meteorológica (mapas sinópticos a diferentes niveles y retro-trayectorias de masas de aire). Los episodios identificados se han confirmado con los informes anuales de resumen de episodios de intrusiones africanas disponible en el portal de Evaluación y datos de calidad del aire del MITECO (<https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/evaluacion-y-datos-de-calidad-del-aire/fuentes-naturales/prediccion-episodios-2025.html>).

Considerando que la metodología utilizada en este estudio (dispersión láser calibrada con TEOM) es distinta de la empleada por las estaciones de calidad del aire oficiales (atenuación beta), se ha descartado la corrección de los datos correspondientes a períodos de intrusiones de polvo sahariano con medidas de estaciones de la RVC-CA consideradas de fondo. No se dispone de un sensor situado en una localización de fondo, por lo que tampoco se puede realizar esta corrección con datos propios. Esto posiblemente resulta en una infraestimación del número de días con superación de los umbrales, ya que esos datos simplemente no se han tenido en cuenta. Por ello, el número o fracción de días con superaciones de los umbrales indicado en este trabajo debe considerarse como un límite inferior.



Figura 6. Sensores colgados de mochilas preparados para un muestreo a pie.

3.2.2. Medidas móviles

3.2.2.1. Adquisición y almacenamiento de datos

El firmware y el software de almacenamiento y visualización disponibles en *sensor.community* no ofrecen la posibilidad de realizar medidas móviles con geolocalización. Al registrar un equipo en la comunidad, hay que proporcionar un único par de coordenadas geográficas en las que se entiende que se realizarán siempre las medidas. Sin embargo, uno de los objetivos de este trabajo es visualizar la distribución de contaminantes en distintas áreas de la ciudad, lo que hace imprescindible el uso de dispositivos portátiles. La ventaja del equipo recomendado por *sensor.community* (NodeMCU, SDS011, BME280, cable USB y tubo protector) es que pesa muy poco (300 gr) y ocupa un volumen muy pequeño (1 l), lo que hace posible transportarlo enganchado a una mochila (Figura 6). La solución para alimentar el dispositivo es usar una batería portátil con suficiente autonomía (Figura 7)). El acceso a internet, de ser necesario, se puede proporcionar mediante la conexión compartida de un teléfono móvil. Sin embargo, el firmware de *sensor.community* para la plataforma NodeMCU contempla la comunicación con APIs personalizadas (Figura 7a). Esto es clave porque nos ha permitido desarrollar una pequeña aplicación de Android (PollutionGPS.apk) mediante la cual los datos georreferenciados pueden almacenarse en el mismo teléfono que proporciona la hora y el GPS vía conexión compartida, sin ser necesaria siquiera la conexión a internet del sensor. La aplicación (Figura 7c) ha sido desarrollada por la profesora María Bermúdez-Edo, profesora de la ETSIIT-Ugr y

voluntaria del proyecto y está disponible en Github (<https://github.com/mbermudez/PollutionGPS-apk>).

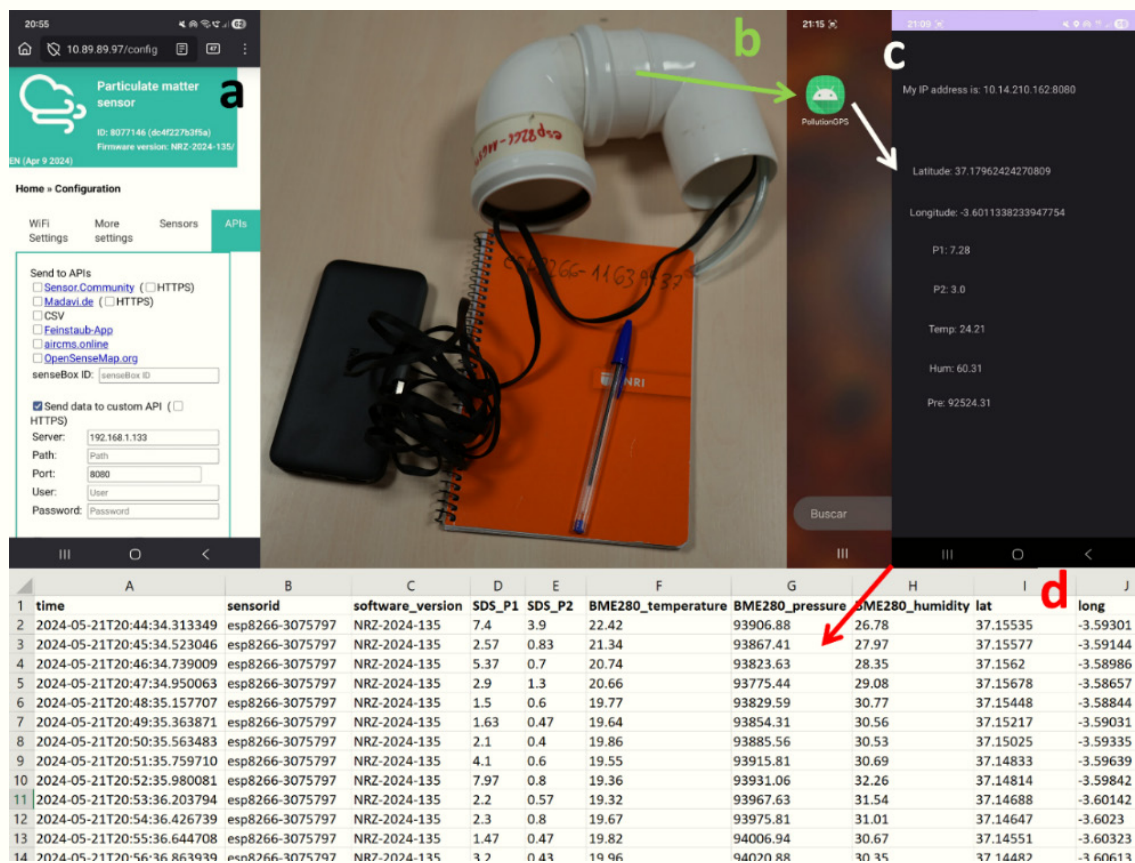


Figura 7. Configuración portátil del equipo: (a) Firmware de la plataforma NodeMCU con selección de API personalizada. (b) Equipo alimentado por batería externa. (c) Capturas de pantalla del icono de acceso a la app y de la pantalla principal de la app mostrando coordenadas geográficas (GPS), concentración de partículas (sensor SDS011), temperatura, humedad y presión (sensor BME280). (d) Hoja de cálculo creada por la app con los datos de reloj y GPS del teléfono y los datos de los sensores transferidos por la NodeMCU.

En el foro de discusión de *sensor.community* se ha discutido la posibilidad de hacer los sensores portátiles (<https://forum.sensor.community/t/portable-air-quality-sensor-with-gps/646>). Se sospecha que los sensores podrían ser sensibles a vibraciones y producir medidas inexactas cuando se muestra en el seno de un flujo (por ejemplo un vehículo en movimiento). Los tests en movimiento realizados cerca de sensores estacionarios en este trabajo indican que los sensores pueden utilizarse en movimiento a pie o en bicicleta a baja velocidad. Las medidas han de realizarse procurando que el sensor no sufra fuertes vibraciones y asegurándose que el tubo de muestreo no está obstruido por la propia mochila o la ropa del portador.

Los datos almacenados en los teléfonos en la forma indicada en la (Figura 7d) se descargan en un PC para su tratamiento. En este caso no se reduce la resolución temporal dado que el objetivo es conseguir la mejor resolución espacial posible.

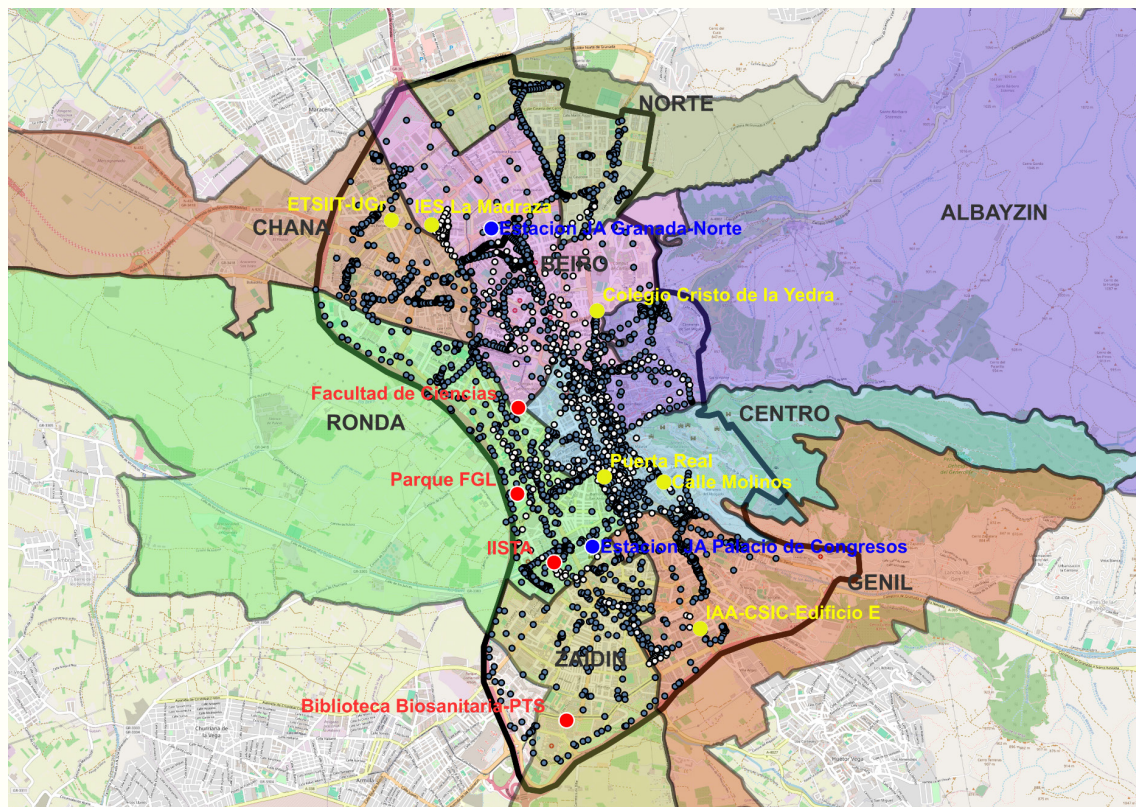


Figura 8. Área de muestreo (contorno grueso). Se indican los puntos en los que se han tomado medidas durante la mañana (blanco) y durante la tarde (gris). Se indican también los puntos de medidas fijas (amarillo), los puntos en los que se situaba la unidad móvil del IISTA durante las calibraciones de los sensores (rojo) y la localización de las estaciones de la RVCCA de la Junta de Andalucía (azul).

3.2.2.2. Área de muestreo y medios de locomoción

El área de muestreo se muestra en la Figura 8 y corresponde a grandes rasgos con la zona de bajas emisiones (ZBE) implementada por el Ayuntamiento de Granada en octubre de 2025 (http://www.movilidadgranada.com/zbe/ZBE_DELIMITACION.pdf). En este caso se excluye la zona de la Carretera de Murcia y el Camino Viejo del Fargue, y se incluye la zona sur del PTS. Uno de los criterios principales a la hora de diseñar los itinerarios de los voluntarios ha sido recorrer calles representativas de cada distrito desde el punto de vista de la arboleda urbana, dado que en paralelo a los muestreos de calidad de aire se ha realizado un muestreo de los árboles de

calle, que es el otro objetivo de este trabajo. Las salidas finalmente cubren la mayor parte del área que queda dentro de la circunvalación, incluyendo calles de todos los distritos, aunque el muestreo en algunas zonas es algo menos denso de lo deseable, como puede verse en el mapa de la **Figura 8**.

La mayoría de los muestreos se han realizado a pie, con una frecuencia de medida de 2 minutos. Algunos muestreos se han realizado en bicicleta con una frecuencia de medida de 1 minuto (circunvalación y norte del distrito Beiro).

3.2.2.3. Selección de los días y las franjas horarias de muestreo

Como criterio general se ha evitado realizar medidas si se han producido precipitaciones inmediatamente antes de la hora propuesta para las medidas de campo. La lluvia favorece la deposición de contaminantes y limpia la atmósfera, lo que resulta en concentraciones de materia particulada anómalamente bajas. Igualmente se han evitado periodos de intrusión de polvo sahariano ya que en ellos las concentraciones de materia particulada son excepcionalmente altas. Se indicó a los voluntarios que durante los muestreos evitaran colocarse cerca de fuentes de emisiones como tubos de escape, para reflejar en la medida de lo posible la concentración instantánea en las aceras.

Las medidas de NO_2 y PM de las estaciones de la RVCCA reflejan una variabilidad semidiurna con un pico de concentración durante la mañana y otro durante la tarde, relacionada con el tráfico rodado (Titos et al. 2017; Casquero-Vera et al. 2021). El pico de la mañana (7:00 – 11:00) suele ser más intenso y está relacionado con la hora punta de entrada al trabajo y centros escolares y la actividad comercial. El pico de la tarde (18:00 – 21:00) coincide con el retorno a los hogares, que suele ser más escalonado, causando emisiones más distribuidas temporalmente. Los factores meteorológicos también determinan esta asimetría: durante la mañana la atmósfera suele ser más estable, lo que dificulta la dispersión, y en la tarde la velocidad del viento tiende a ser más alta y la mayor turbulencia ayuda a dispersar los contaminantes. Considerando este perfil bimodal de contaminación urbana, las salidas de campo se han organizado para muestrear los intervalos temporales en los que se producen los picos, aunque la mayor disponibilidad de los voluntarios ha obligado a realizar la mayor parte de las medidas por la tarde.

3.2.2.4. Datos de referencia y normalización

Al igual que a los datos obtenidos con los sensores fijos, a los datos obtenidos cada minuto (bicicleta) o cada dos minutos (a pie) se aplican los factores de corrección de calibración (**ver sección 3.1.2**). Los datos obtenidos durante los muestreos es-

paciales con baja resolución temporal no pueden compararse directamente con ninguna métrica de calidad del aire, ya que son datos instantáneos y no reflejan la exposición de las personas a determinados niveles de concentración durante un intervalo temporal determinado. No obstante, las medidas instantáneas forman parte de un muestreo en el que se realizan varias medidas en zonas aledañas, de forma que son útiles para identificar áreas en las que las concentraciones elevadas son más frecuentes y por ello es más probable registrar una concentración alta al pasar con el sensor portátil.

Los datos de los muestreos espaciales se normalizan, es decir, se dividen entre los datos de un sensor fijo con el objetivo de eliminar de los datos móviles medidos a lo largo de la duración del proyecto la variabilidad diaria o estacional, de forma que estos solo reflejan la cantidad de materia particulada relativa a un punto fijo en el que si hay una serie de datos larga y comparable con las recomendaciones o los valores máximos legales, que son promedios diarios o anuales. Así se pueden identificar zonas donde las concentraciones son más altas y en las que puede inferirse que existe una fuente de emisiones próxima.

3.2.2.5. Interpolación y generación de mapas

Una vez hecha esta normalización los datos se cargan en el sistema de información geográfica de software libre QGIS (<https://www.qgis.org/>), en el que pueden realizarse distintos tipos de análisis espacial, incluyendo una interpolación de las medidas normalizadas en toda el área de interés para visualizar las zonas en las que las concentraciones de partículas son más altas. En este caso vamos a crear capas vectoriales de puntos a partir de archivos ASCII de texto delimitado en los que hemos almacenado previamente los datos estructurados por la APP PollutionGPS.apk. Sobre estas capas aplicamos la interpolación IDW, que genera una interpolación de distancia inversa ponderada. Los puntos de la capa de interés se ponderan durante esta interpolación de manera que la influencia de un punto en relación con otro disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear. De este modo se rellenan los huecos entre puntos y se genera un mapa de color en el que se pueden identificar patrones espaciales. La resolución elegida para confeccionar estos mapas es un cuadrilátero de unos 100 m de lado, dado que esa es la distancia típica recorrida entre medidas durante los muestreos. Corresponde a un volumen que puede considerarse bien mezclado y reduce considerablemente el tiempo de cálculo comparado con una resolución más fina.

Adicionalmente, el tratamiento de los datos del sensor y su representación gráfica han sido objeto de un trabajo de fin de grado en la ETSIT (<https://github.com/MartaxM/TFG-PyQt-Imputation-App/>). Este software, que no ha sido utilizado en el presente trabajo, permite hacer recuperación de datos perdidos por fallo de los sensores o de la conexión con la API mediante interpolación o algoritmos de inteligencia artificial, y representar las series temporal o espacialmente.





04. Resultados

4.1. Medidas fijas

4.1.1. Calidad de los datos y filtrado

La referencia a los umbrales legales simplifica la comparación de las series temporales de medidas de los sensores con las de los BAM de la RVCCA de la Junta de Andalucía. Sin embargo, es importante hacer hincapié aquí de nuevo en que los datos obtenidos en este proyecto no tienen validez legal frente a los registrados por las estaciones de la RVCCA. No obstante, al realizar una comparación de los datos obtenidos durante el proyecto con los límites legales, se puede por ejemplo recabar información independiente sobre la idoneidad de la localización de las estaciones oficiales. Para poder comparar los resultados con las medidas equivalentes (BAM, TEOM) y con los umbrales de concentración diaria establecidos en la legislación vigente y la que entrará próximamente en vigor, los datos obtenidos con los sensores fijos han de reducirse a series de promedios diezminutales, horarios y diarios. Los umbrales se establecen como valores diarios promedio, número de superaciones anuales del valor diario promedio y promedios anuales. Por otro lado, con el objetivo de usar las medidas de los sensores para indagar los mecanismos de emisión y dispersión de partículas, se han de calcular los perfiles promedio de evolución diaria, semanal y anual.

La primera tarea es asegurar la calidad de los datos excluyendo periodos de muestreo insuficiente por intermitencias en el funcionamiento del sensor o de la conexión a internet. El criterio de la Directiva 08/50/CE es considerar únicamente aquellos casos en los que están disponibles un 90 % de los datos del periodo considerado. La (Tabla 5) muestra que los valores diezminutales con series largas (ETSIIT-UGr, IAA-CSIC, Cristo de la Yedra) están cercanos al cumplimiento de este requisito. Con el objetivo de rescatar el máximo número posible de datos, en este estudio se ha relajado el criterio para los promedios horarios y diarios. En el caso de los promedios diarios, se considera que son válidos si están disponibles al menos el 50 % de los valores diezminutales disponibles.

Para los promedios diarios se establece que el muestreo diario es suficiente si cada una de las franjas horarias 0:00–6:00, 6:00–12:00, 13:00–18:00, 19:00–00:00 contiene al menos 3 periodos de 10 minutos válidos. Este criterio se fundamenta en un muestreo homogéneo del perfil bimodal de contaminación urbana mencionado en la [sección 3.2.2.3](#). Por otro lado, para el cálculo de promedios diarios válidos para la contabilización de número de días que superan los umbrales es necesario excluir del conjunto de datos validados los días de calima. Por último, la corrección de humedad relativa requiere de la existencia de valores de esta variable, por lo que finalmente hay que excluir de las series los valores de PM que no tienen su correspondiente valor de HR por fallo del sensor. Puede verse en la [Tabla 5](#) como el porcentaje de promedios diarios válidos filtrados de las tres series largas está entre el 73 % y el 83 %.

Tabla 5. Periodos de medida, número de medidas válidas y número de datos diezminutales, horarios y diarios válidos obtenidos con los sensores fijos.

PUNTO FIJO DE MEDIDA	PERIODO	DÍAS	MEDIDAS 3-MIN VÁLIDAS	PROMEDIOS 10-MIN VÁLIDOS ^a	PROMEDIOS HORARIOS VÁLIDOS ^b	PROMEDIOS DIARIOS VÁLIDOS ^c	DÍAS DE CALIMA ^d	PROMEDIOS DIARIOS VÁLIDOS FILTRADOS ^e
ETSIIT-UGr	22.3.2024 – 3.2.2026	684	284091 (87%) 279948 ^f (85%)	88424 (90%) 87385 (89%)	14798 (90%) 14577 (89%)	599 (88%) 592 (86%)	92/117	507 (74%) 499 (73%)
IAA-CSIC	4.3.2024 – 2.2.2026	701	315743 (93%)	95104 (94%)	16023 (95%)	657 (94%)	109/120	548 (83%)
C. de la Yedra	7.3.2025 – 3.2.2026	334	157142 (98%)	47436 (99%)	7925 (99%)	328 (98%)	58/61	270 (80%)
Calle Molinos	14.10.2025 – 3.2.2026	113	38262 (71%)	11518 (71%)	1951 (72%)	71 (62%)	2/4	69 (62%)
Fuente Batallas	17.4.2024 – 28.4.2024	12	3953 (72%)	1207 (73%)	210 (76%)	7 (58%)	0	7 (58%)
IES Madraza	3.12.2024 – 20.12.2024	18	8103 (100%)	2430 (100%)	368 (90%)	16 (89%)	1/2	15 (83%)

^a Un promedio de 10 minutos se considera válido si comprende al menos una medida de 3 minutos

^b Un promedio horario se considera válido si comprende al menos 3 periodos de 10 minutos válidos.

^c Un promedio diario se considera válido si cada una de las franjas horarias 0:00–6:00, 6:00–12:00, 13:00–18:00, 19:00–00:00 contiene al menos 3 periodos de 10 minutos válidos

^d Días de calima coincidentes con días de medias válidas / Días de calima en el periodo de medidas

^e Promedios diarios válidos excluyendo los datos afectados por intrusiones de polvo sahariano.

^f En cursiva: número de medidas válidas de PM₁₀ para las cuales existen medidas simultáneas de humedad relativa. El sensor BME280 colocado en ETSIIT-UGr dejó de funcionar a principios de febrero de 2026, por lo cual no es posible realizar la corrección de crecimiento higroscópico de los datos de PM correspondientes a ese periodo.

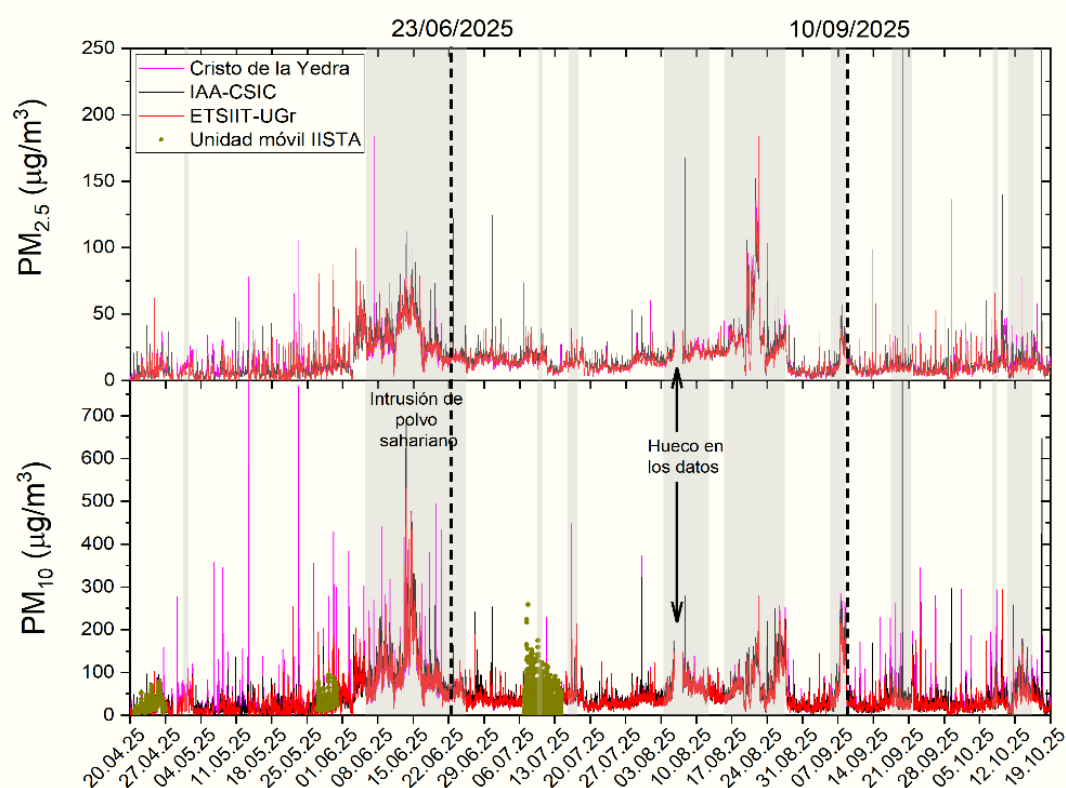


Figura 9. Periodo de las series de datos diezminutales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (panel superior e inferior, respectivamente) entre el 20 de abril y el 19 de octubre de 2025. Se aprecia un hueco en los datos en torno al 6–8 de agosto y varios eventos de intrusión de polvo sahariano, entre ellos uno muy persistente con una duración de 20 días entre el 4 de junio y el 24 de junio. Los datos obtenidos en el Colegio Cristo de la Yedra muestran señales transitorias más intensas que los otros sensores fijos en el periodo lectivo (antes del 23 de junio y después del 10 de septiembre de 2025). Estos picos se dan en casi todos los casos entre el comienzo y el final del horario escolar.

Como ejemplo, la **Figura 9** muestra un tramo de la serie temporal de promedios diezminutales de PM_{10} del sensor situado en el IAA-CSIC, en la que se aprecia un periodo que ha de ser excluido en el cálculo de promedios por falta de datos y varios periodos que no pueden ser incluidos en el análisis de calidad del aire debido a una intrusión de polvo sahariano. También se aprecia como la precisión de los sensores permite, por ejemplo, registrar la ausencia de actividad en el Colegio Cristo de la Yedra fuera del periodo lectivo.

4.1.2. Calibraciones

La (Tabla 6) contiene una lista de las comparaciones in situ con el TEOM del IISTA y las estaciones de la RVCCA de la Junta de Andalucía realizadas en 2024 y 2025. Además de estas campañas in situ, normalmente de una semana de duración, se han ido realizando comparaciones ex situ de los sensores fijos con las medidas del TEOM durante los períodos indicados en la Tabla 7. Las localizaciones son generalmente urbanas de fondo o expuestas a tráfico moderado por lo que asumiremos que son directamente comparables a las de los sensores.

Tabla 6. Comparación de los sensores con los instrumentos de referencia en 2024 y 2025. Para las calibraciones de los sensores solo se han empleado las medidas del TEOM.

FECHA	LUGAR	REFERENCIA	VARIABLES	SENSORES
Enero 2024	Facultad de Ciencias	Unidad móvil IISTA, TEOM	PM _{10r} , HR	fijos del IAA y ETSIIT + 4 portátiles (1 falla)
Febrero 2024	Palacio de Congresos	Estación RVCCA, BAM	PM _{2.5r} , PM _{10r} , HR	fijos del IAA y ETSIIT + 4 portátiles
Junio 2024	IISTA	Unidad móvil IISTA, TEOM	PM _{10r} , HR	5, solo sensores portátiles
Noviembre 2024	Biblioteca PTS – UGr	Unidad móvil IISTA, TEOM	PM _{10r} , HR	fijos de Cristo de la Yedra y ETSIIT + 8 portátiles
Diciembre 2024	Granada Norte – UGr	Estación RVCCA, BAM	PM _{2.5r} , PM ₁₀	Por cercanía: sensores en el IES la Madraza y en la ETSIIT
Mayo 2025	Facultad de Ciencias - UGr	Unidad móvil IISTA, TEOM	PM _{10r} , HR	fijo del IAA y 6 sensores portátiles
Noviembre 2025	Facultad de Ciencias - UGr	Unidad móvil IISTA, TEOM	PM _{10r} , HR	7, solo sensores portátiles

Las calibraciones consisten en la determinación del factor de masa de los sensores SDS011 mediante la representación gráfica de las concentraciones medidas por estos frente a las medidas por el instrumento de referencia, en periodos en los que la humedad está por debajo del 75 % o habiendo corregido previamente el efecto de la humedad como se indica a continuación. De forma similar, se pueden obtener factores de corrección de la humedad relativa medida por los sensores BME280 representán-

dola frente a los valores de HR medidos por la estación meteorológica de la estación de referencia. El control de la deriva del factor de masa se lleva a cabo mediante la realización de varias calibraciones in situ a lo largo del periodo de medidas, junto con comparaciones ex situ intermedias que ayudan a visualizar la evolución mensual. El crecimiento higroscópico de las partículas, que puede falsear las medidas, se corrige realizando una parametrización de la dependencia de las medidas de los SDS011 con la HR. Habitualmente se emplean las medidas de RH del sensor BME280 para efectuar esta corrección lo que implica a su vez que estos deben estar corregidos.

Tabla 7. Periodos de medida del TEOM en la unidad móvil del IISTA que se han comparado con los sensores fijos en la ETSIIT-UGr, el IAA-CSIC y el Colegio Cristo de la Yedra, con el objetivo de hacer un seguimiento de la deriva de los factores de calibración.

PERIODO	LUGAR	CLASIFICACIÓN	SENSOR MÁS CERCANO
Marzo 2024	Hospital Real	Urbana de fondo	Cristo de la Yedra
Abril 2024	Biblioteca Biosanitaria UGr (PTS)	Urbana de fondo	IAA-CSIC
Mayo 2024	Biblioteca Biosanitaria UGr (PTS)	Urbana de fondo	IAA-CSIC
Julio 2024	CEAMA-IISTA	Urbana de fondo	IAA-CSIC
Septiembre 2024	Facultad de Ciencias – UGr	Urbana de tráfico	Cristo de la Yedra
Febrero 2025	Facultad de Bellas Artes – UGr	Urbana de fondo	ETSIIT-UGr
Marzo 2025	Facultad de Farmacia – UGr	Urbana de fondo	Cristo de la Yedra
Abril 2025	Facultad de Farmacia – UGr	Urbana de fondo	Cristo de la Yedra
Mayo 2025	Facultad de Ciencias – UGr	Urbana de tráfico	Cristo de la Yedra
Julio 2025	Facultad de Ciencias – UGr	Urbana de tráfico	Cristo de la Yedra

4.1.2.1. Calibraciones del factor de masa y su deriva

Como se ha mencionado en la sección 3.1.1, el sensor SDS011 es un detector de $PM_{2.5}$ que utiliza un método no revelado por el fabricante para derivar PM_{10} . Desafortunadamente el instrumento del IISTA sólo mide PM_{10} , por lo que la calibración de los SDS011 con este instrumento es esencialmente una calibración indirecta de $PM_{2.5}$. La **Figura 10** muestra las gráficas de dispersión de los valores de PM_{10} de los sensores frente a los del TEOM de unidad móvil durante la primera calibración en aparcamiento de la Facultad de Ciencias en

enero de 2024. Las líneas rojas representan los ajustes lineales por mínimos cuadrados, es decir, la línea que pasa más cerca de todos los puntos en la nube:

(E1)

$$PM_{10}^{sensor} = a + b \times PM_{10}^{TEOM}$$

donde a es la ordenada en el origen y b la pendiente. Una vez determinados a y b por regresión lineal, pueden convertirse las medidas del sensor en medidas reales (calibradas) mediante la siguiente formula:

(E2)

$$PM_{10}^{masa} = \frac{(PM_{10}^{sensor} - a)}{b}$$

La **Tabla 8** muestra los parámetros de cuatro ajustes, incluyendo la ordenada en el origen (a), la pendiente (b) y el coeficiente de correlación al cuadrado (R^2), que indica la bondad del ajuste (cuanto más próximo a 1 mejor ajuste).

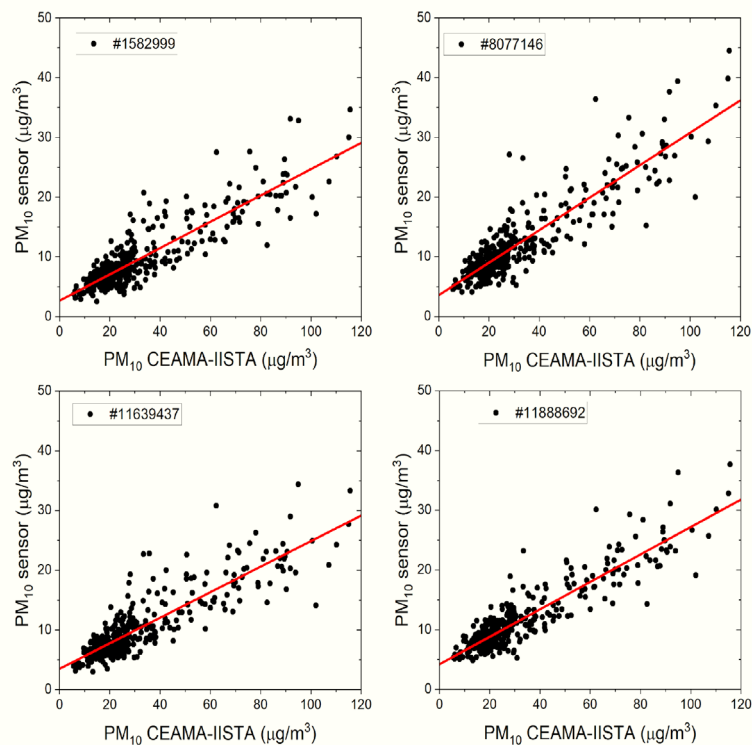


Figura 10. Primera calibración in situ de sensores SDS011 llevada a cabo en enero de 2024 bajo condiciones de baja humedad (<75%). Los parámetros de calibración y el coeficiente de correlación se incluyen en la Tabla 7.

La inspección visual de las regresiones lineales en la **Figura 10** indica que la ecuación lineal E1 describe la relación entre los SDS011 y el TEOM de forma aceptable. Los coeficientes de correlación al cuadrado en la **Tabla 8** indican que las correlaciones entre las medidas de los SDS011 y del TEOM es razonablemente alta. La concentración de PM_{10} obtenida con los SDS011 es aproximadamente un factor 4 más baja que la concentración real (factor de masa). La diferencia se debe probablemente a que la calibración integrada en los SDS011 se ha realizado con aerosoles muy diferentes de los presentes en Granada. Además del factor de masa, la relación E1 incluye una pequeña corrección aditiva que en muchos casos es significativamente distinta de cero.

Debido a que el TEOM es un instrumento de medida equivalente, se le aplican factores de corrección obtenidos por comparación con la técnica de referencia (gravimetría). Los factores de corrección para los años 2024 y 2025 son respectivamente 0.93 y 0.96. Considerando que estas desviaciones son muy pequeñas y que han sido obtenidas a posteriori del análisis no han sido aplicadas a los datos del TEOM. No obstante, han de tenerse en cuenta si se quieren comparar estos datos con los obtenidos por los BAM de la RVCCA.

Tabla 8. *Parámetros de las regresiones lineales de los datos de PM_{10} de cuatro sensores frente a los del TEOM de la unidad móvil del IISTA (Calibración de enero de 2024, Facultad de Ciencias de la UGr).*

IDENTIFICADOR DEL SENSOR	A (MG/M ³)	B	R ²
#1528999 (ETSIIT)	2.64 ± 0.24	0.2202 ± 0.006	0.7819
#8077146	3.6 ± 0.3	0.2719 ± 0.007	0.80017
#11639437	3.50 ± 0.25	0.2139 ± 0.006	0.75566
#11888692	4.21 ± 0.22	0.2299 ± 0.006	0.8205

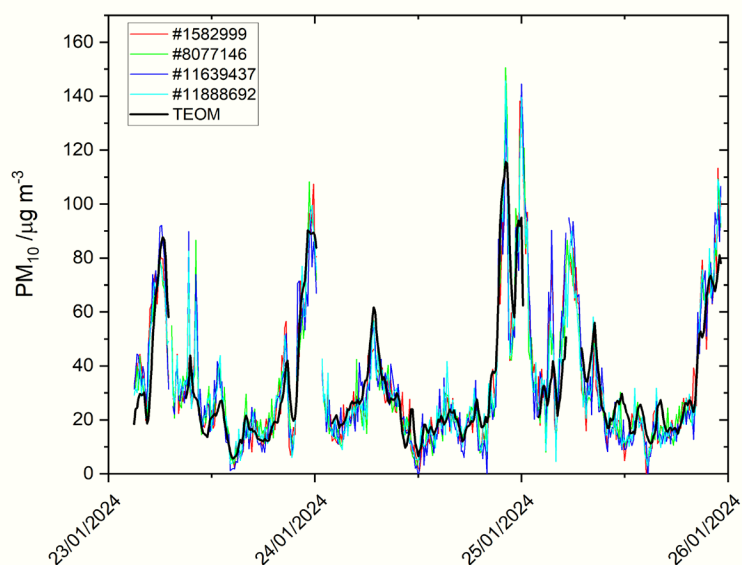


Figura 11. Comparación de las series temporales del TEOM y de los cuatro sensores una vez aplicados los parámetros de calibración obtenidos de los ajustes en la **Figura 10**.

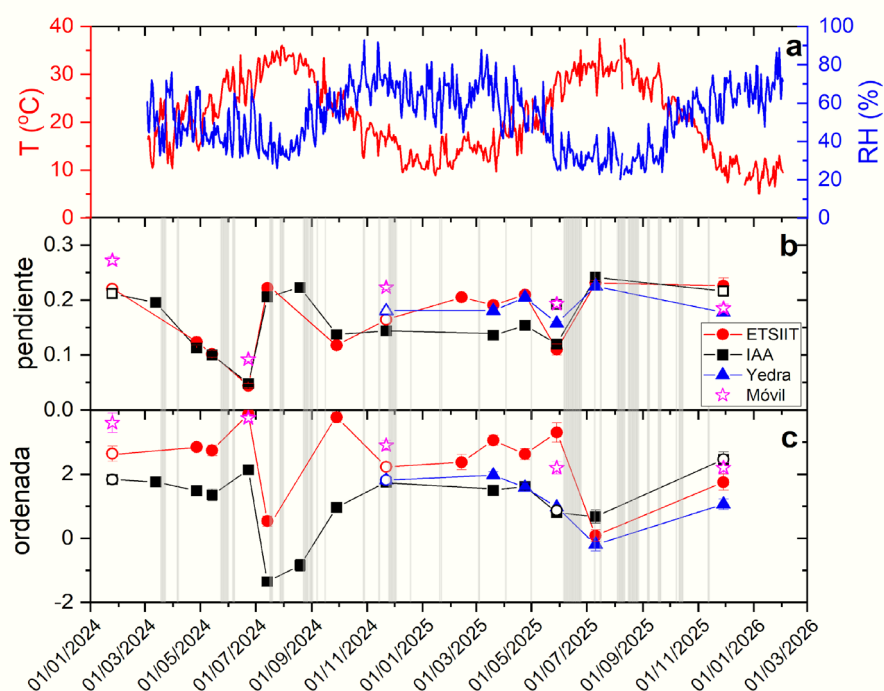


Figura 12. Deriva de los factores de calibración de los sensores situados en la ETSIIT-UGr (círculos rojos), el IAA-CSIC (cuadrados negros), el Colegio Cristo de la Yedra (triángulos azules) y uno de los sensores móviles (estrellas rosas) a lo largo de los dos años proyecto. (a) Promedios diarios de temperatura y humedad. (b) Deriva de la pendiente. (c) Deriva de la ordenada en el origen. Los símbolos vacíos indican los factores de calibración obtenidos en comparaciones in situ. Las bandas grises indican eventos de intrusión de polvo.

La deriva de la ordenada a y la pendiente b se muestran en la **Figura 12**. Puede verse como el factor de masa varía a lo largo de los dos años del proyecto, aunque la variación está claramente correlacionada con la variación estacional de la humedad o la temperatura. No existe tampoco evidencia de que los episodios de intrusión de polvo sahariano afecten a las calibraciones. Las pendientes obtenidas en las calibraciones in situ están en torno a 0.15–0.25, tanto para los sensores fijos que se muestran en la **Figura 12** como para los sensores portátiles, y coinciden en muchos casos con las pendientes obtenidas ex situ. Sin embargo, se observan periodos donde los factores de masa son sistemáticamente más bajos y se aprecian algunas tendencias, como entre febrero y julio de 2024, donde se produce una reducción importante del factor de masa, o entre febrero y julio de 2025, donde la tendencia es la contraria.

Para tener en cuenta la deriva de los factores de calibración a lo largo de los dos años de medidas, se han usado los factores de calibración obtenidos de las comparaciones ex situ.

4.1.2.2. Calibración de $PM_{2.5}$

Para trasladar la calibración de PM_{10} a $PM_{2.5}$ es necesario comprobar que los factores de calibración son de hecho similares. Por ello se han realizado comparaciones adicionales con las medidas de los sistemas BAM de las estaciones de la RVCCA de la Junta de Andalucía en Palacio de Congresos (**Figura 13**) y Granada Norte (**Figura 15**). Las estaciones de la RVCCA utilizan dos sistemas BAM independientes, uno dedicado exclusivamente a PM_{10} y otro a $PM_{2.5}$, a diferencia de otras estaciones que podrían usar un solo monitor con cabezal intercambiable o un sistema de muestreo simultáneo. Los datos diezminutales de los BAM parecen incluir ya algún tipo de redondeo y suavizado. Las gráficas de dispersión en la **Figura 13** y la **Figura 15** muestran como los valores se han redondeado aparentemente al entero más cercano. La **Figura 14** muestra como los valores de los BAM aparecen suavizados, en contraste con los del TEOM en la **Figura 11**, que muestran mucha una variabilidad similar a la registrada por los SDS011 en la misma escala diezminutal.

Tabla 9. *Parámetros de las regresiones lineales de los datos de PM_{10} y $PM_{2.5}$ de dos sensores frente a los de los instrumentos BAM de la RVCCA de la Junta de Andalucía (comparaciones de febrero de 2024 en la estación de Palacio de Congresos y diciembre de 2024 en la Granada-Norte).*

		PALACIO DE CONGRESOS		GRANADA NORTE	
		#1528999	#4528094	#1528999	#4528094
PM_{10}	a ($\mu g/m^3$)	0.43 ± 0.22	-0.32 ± 0.20	1.61 ± 0.15	0.79 ± 0.15
	b	0.410 ± 0.010	0.365 ± 0.012	0.330 ± 0.006	0.330 ± 0.005
	R^2	0.5839	0.5361	0.5889	0.5986
$PM_{2.5}$	a ($\mu g/m^3$)	0.63 ± 0.01	0.37 ± 0.10	1.05 ± 0.09	0.85 ± 0.08
	b	0.235 ± 0.010	0.206 ± 0.009	0.331 ± 0.007	0.287 ± 0.007
	R^2	0.4414	0.7080	0.4709	0.4121

La **Tabla 9** muestra los parámetros de los ajustes lineales de las medidas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} de dos sensores SDS011 frente a las medidas de los instrumentos BAM en ambas estaciones. Los sensores SDS011 son los mismos en ambas comparaciones.

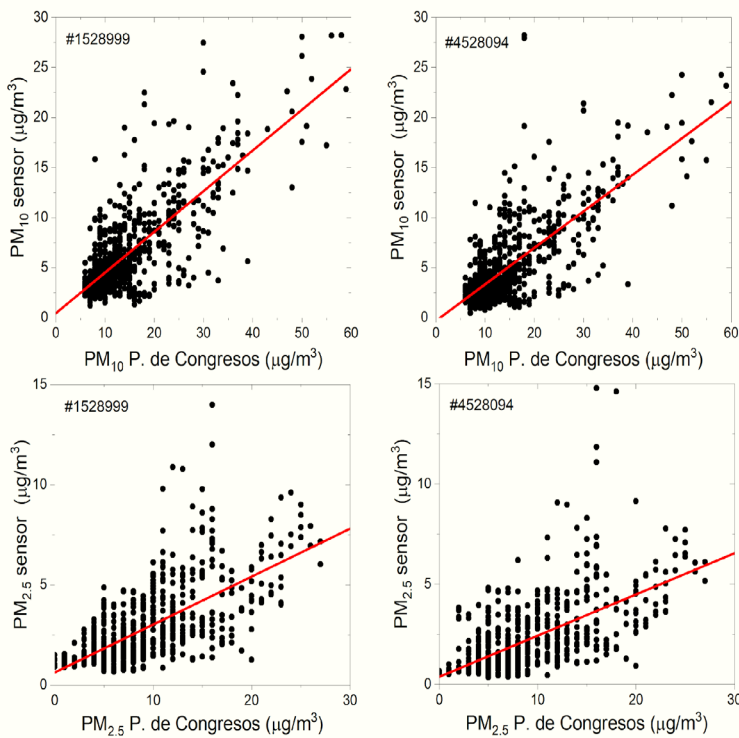


Figura 13. *Calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la estación de la RVCCA de Palacio de Congresos. Nótese la pobre resolución de los instrumentos BAM.*

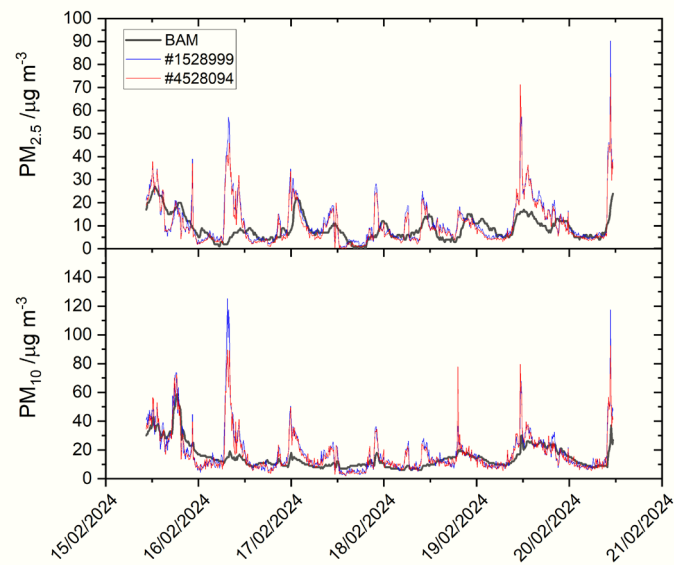


Figura 14. Comparación de las series temporales del BAM y de dos sensores una vez aplicados los parámetros de calibración obtenidos de los ajustes en la [Figura 13](#).

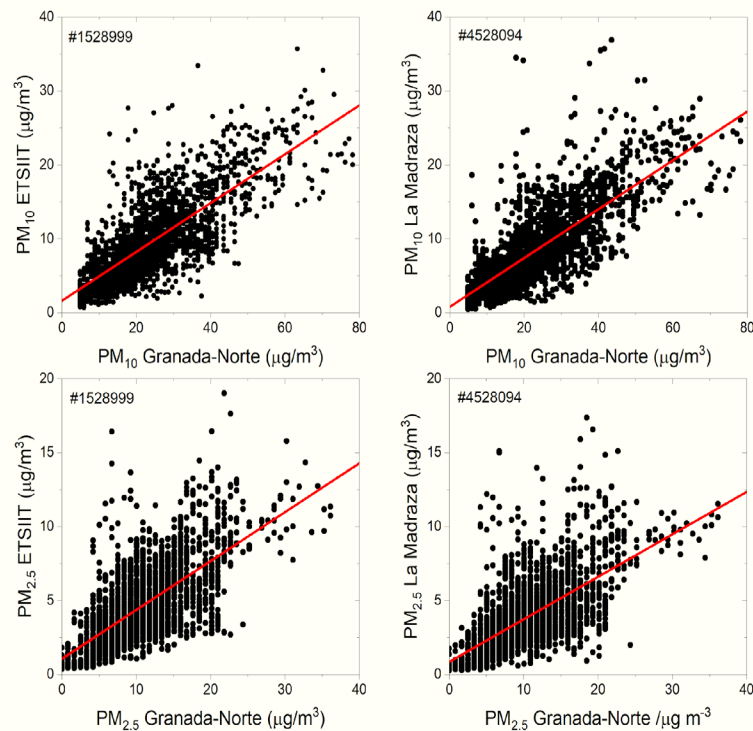


Figura 15. Calibración de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las proximidades de la estación de la RVCCA de Granada-Norte.

En la comparación de los SDS011 con los BAM de Palacio de Congresos, las pendientes de las calibraciones de PM_{10} son aproximadamente 1.8 veces mayores que las de

$PM_{2.5}$. Sin embargo, las pendientes obtenidas en la comparación con Granada Norte para PM_{10} y $PM_{2.5}$ son esencialmente iguales. Como en los sensores SDS011 la medida de PM_{10} es en parte derivada de $PM_{2.5}$, esto sugiere que capturaron correctamente el cociente $PM_{2.5}/PM_{10}$ en la comparación de diciembre de 2024, pero no en la de febrero. Esto no está necesariamente relacionado con el hecho de que las pendientes de PM_{10} variaran de una comparación a otra, ya que las calibraciones realizadas con el TEOM en enero y noviembre de 2024 (con menos de quince días de diferencia con las comparaciones con los BAM) muestran un valor $b = 0.2$ para PM_{10} (Figura 12), lo que sugiere que aparte de posibles errores en las medidas de los sensores, existe una discrepancia entre el TEOM y los BAM, que analizaremos posteriormente. A falta de otras indicaciones, procederemos asumiendo que el factor de calibración es el mismo en ambas fracciones de tamaño y posteriormente trataremos de examinar los cocientes $PM_{2.5}/PM_{10}$ medidos por los BAM para estimar el error en la calibración de $PM_{2.5}$. Nótese que idealmente la calibración debería hacerse con $PM_{2.5}$, que es lo que realmente miden los SDS011, pero siendo nuestro instrumento de referencia un TEOM que solo mide PM_{10} , no ha habido otra opción, dado que además en este trabajo se desea realizar una valoración independiente de las medidas de la RVCCA.

4.1.2.3. Corrección de las medidas de humedad relativa

Los sensores BME280 proporcionan medidas de temperatura, humedad y presión que ayudan a contextualizar las medidas de partículas del SDS011. Estos sensores pueden mostrar desviaciones con respecto a las medidas de humedad y temperatura de una estación meteorológica profesional, debido al efecto de autocalentamiento y del estancamiento del aire. Por ello, si las medidas de humedad relativa van a ser usadas para corregir las medidas de PM_{10} y $PM_{2.5}$, es conveniente realizar una comparación previa con la humedad relativa de una estación meteorológica. En nuestro caso disponemos de las medidas de humedad de la estación meteorológica instalada en la unidad móvil del IISTA.

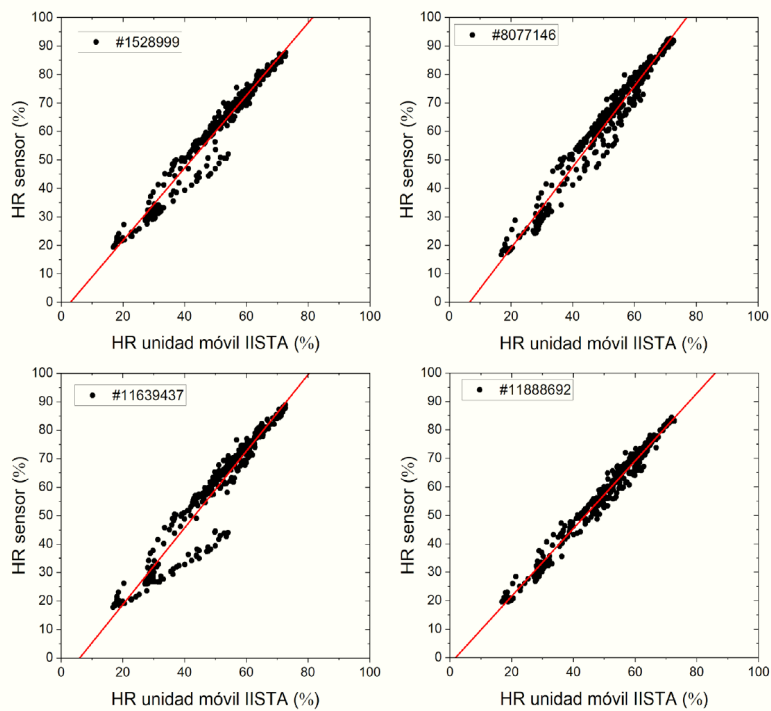


Figura 16. Calibración *in situ* de sensores BME280 llevada a cabo en enero de 2024. Los parámetros de calibración y el coeficiente de correlación se incluyen en la **Tabla 10**.

La **Figura 16** muestra las gráficas de dispersión de los valores de HR de los sensores frente a los de la estación meteorológica de la unidad móvil del IISTA durante la primera calibración en aparcamiento de la Facultad de Ciencias en enero de 2024 . Las líneas rojas representan los ajustes lineales por mínimos cuadrados. La (**Tabla 10**) muestra los parámetros de cuatro ajustes lineales y el coeficiente de correlación al cuadrado (R^2).

Tabla 10. Parámetros de las regresiones lineales de los datos de HR de cuatro sensores frente a los de la unidad móvil del del IISTA (Calibración de enero de 2024, Facultad de Ciencias de la UGr).

IDENTIFICADOR DEL SENSOR	a ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	b	R^2
#1528999 (ETSIT)	-3.8 ± 0.6	1.275 ± 0.011	0.96878
#8077146	-9.4 ± 0.7	1.422 ± 0.013	0.96666
#11639437	-8.1 ± 0.9	1.345 ± 0.018	0.93412
#11888692	-2.2 ± 0.4	1.188 ± 0.008	0.98032

4.1.2.4. Corrección de crecimiento higroscópico

Las medidas de PM_{10} muestran una clara dependencia de la humedad relativa, como se indica en la **Figura 17**, en la que se representan los cocientes de los PM_{10} medidos por los sensores entre el medido por el TEOM en función de la humedad relativa. La dependencia del consiente puede parametrizarse mediante la siguiente expresión:

(E3)

$$PM_{10}^{sensor} = \left(1 + c \left(\frac{HR}{100} \right)^d \right)$$

donde c y d son parámetros ajustables y $PM_{10\ TEOM}$ representa la medida de masa, independiente del tamaño de las partículas. En la ecuación (E3) estamos asumiendo que los valores medidos por los SDS011 y el TEOM son los mismos a baja humedad. Para poder ajustar esta ecuación a los valores medidos durante las calibraciones, es necesario normalizar los valores de $PM_{10\ sensor} / PM_{10\ TEOM}$ a 1 para valores de la humedad relativa que no tienen efecto en la medida de los SDS011 (por ejemplo inferiores al 50%). Una vez determinados los valores c y d , podemos aplicar la ecuación (E4) de corrección de crecimiento higroscópico a los valores calibrados según la ecuación (E2):

(E4)

$$PM_{10}^{corregido} = \frac{PM_{10}^{masa}}{\left(1 + c \left(\frac{HR}{100} \right)^d \right)}$$

donde PM_{10}^{masa} es la medida del sensor SDS011 con la corrección de masa según la ecuación (E2) y HR la humedad relativa.

La **Figura 17** muestra ajustes de la ecuación (E3) para seis de los sensores presentes durante la comparación de noviembre de 2024. Durante esta comparación la humedad relativa experimentó grandes variaciones, lo que permitió realizar mejores ajustes que en otras comparaciones. Las medias ponderadas de los parámetros de los once ajustes son $c = 2.59 \pm 0.09$ y $d = 6.13 \pm 0.18$. Puesto que en este caso se trata de corregir un efecto ambiental que afecta a todos los sensores por igual, hemos optado por aplicar la corrección. No obstante, hay que tener en cuenta que c y d pueden ser diferentes para distintos tipos de aerosoles con diferente higroscopicidad.

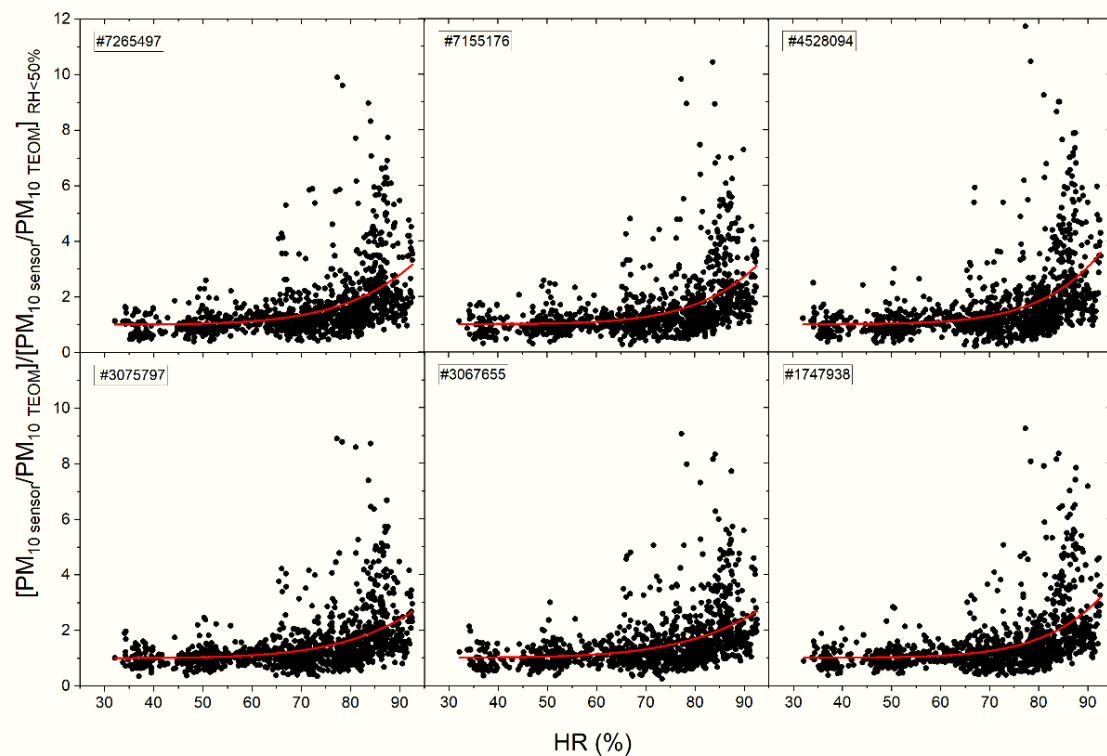


Figura 17. Representación gráfica de los cocientes entre las medidas de PM_{10} de varios sensores y las del TEOM del IISTA frente a la humedad relativa medida por la estación meteorológica del IISTA. Las líneas rojas representan los mejores ajustes a la ecuación (E3). Los datos fueron obtenidos durante la comparación in situ de noviembre de 2024.

4.1.3. Estimación de incertidumbre y límite de detección

Según el fabricante del sensor SDS011, el error relativo a 25 °C y humedad relativa del 50 % es el máximo del 15 % del valor medido y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tabla 3), sin proporcionar más aclaraciones. Este último valor es posiblemente el obtenido de la calibración de factor de masa realizada por el fabricante que, como hemos visto, no se ajusta al tipo de aerosol medido en este proyecto, donde los valores crudos proporcionados por el detector son del orden de $0\text{--}20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Consideraremos que el valor del 15 % corresponde al error estadístico o repetibilidad de una medida.

Utilizando la ley de propagación de incertidumbre sobre la ecuación de calibración puede obtenerse una estimación de la incertidumbre de los datos calibrados. La Figura 18 muestra la dependencia del error relativo (una desviación estándar) de las medidas instantáneas y diezminutales con la concentración de PM_{10} . Las calibraciones se realizan con medidas diezminutales, ya que ese es el periodo de medidas del instrumento de referencia.

En una segunda etapa puede estimarse el error propagado a partir de la corrección de humedad relativa (ecuación E4) usando la misma metodología. La **Figura 18** muestra como la corrección de humedad incrementa sustancialmente el error relativo. En días de humedad relativa inferior al 70 % (no se aplica la corrección de humedad), el error en el rango típico de promedios diarios ($5\text{--}50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$) iría del 25 % al 5 %. En días en los que se aplica la corrección de humedad, esta dependerá del ciclo de humedad diario. Puede verse en la **Figura 18** que si la humedad fuera del 85 % y constante a lo largo de un día, el error en el rango típico de promedios diarios iría del 3 % al 20 %. Las incertidumbres para las medidas de $\text{PM}_{2.5}$ son similares.

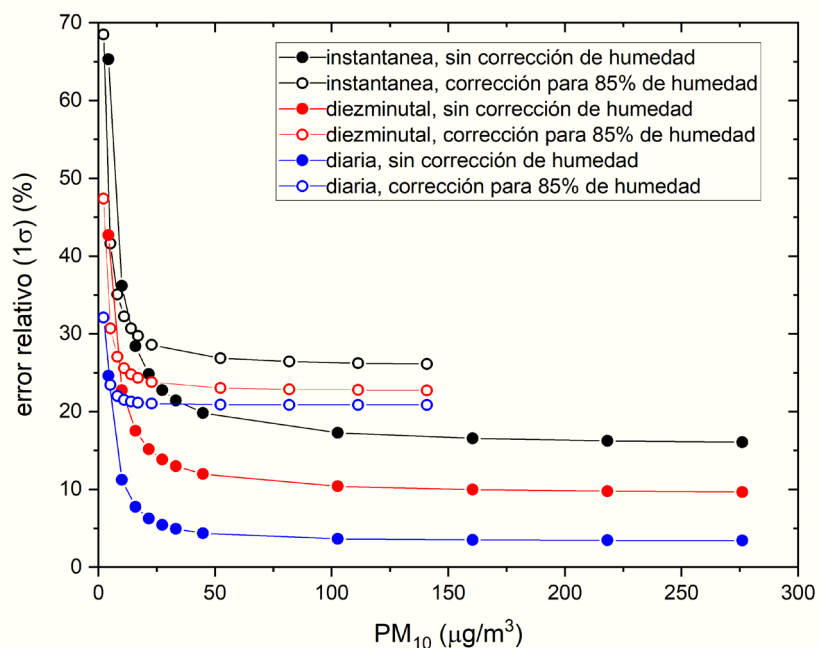


Figura 18. Estimación del error relativo (una desviación estándar) de las medidas calibradas (medidas instantáneas en negro, promedios diezminutales en rojo, promedios diarios en azul) obtenida de una calibración promedio a partir de todas las calibraciones de sensores realizadas a lo largo del proyecto. Los círculos rellenos muestran valores sin corrección de humedad y los círculos vacíos muestran los valores corregidos para una humedad relativa del 85 % (asumiendo que fuera constante durante todo el periodo de promediado). En el eje y se muestra la variación correspondiente del error relativo.

Otro parámetro importante que considerar es el límite de detección (*limit of detection*, LOD), es decir, el valor a partir del cual una medida es distinta de ruido con una probabilidad del 99 %. Para calcular el LOD de los sensores fijos hemos buscado los periodos en los que las concentraciones de materia particulada son más bajas: en la madrugada (de 2 a 5 de la mañana UTC), según indica la evolución diaria promedio

(ver sección 4.1.5), en periodos sin intrusión de polvo sahariano, y en días de lluvia (según acumulaciones medidas en la estación meteorológica de Cartuja de la AE-MET). Filtrando los datos con estos criterios, y eliminando además datos en los que se observan tendencias claras, se obtiene una línea base que consideramos como ruido (símbolos rojos en los paneles **a** y **b** de la **Figura 19**). Nótese que los valores negativos que aparecen en la serie de datos calibrados son un artefacto del proceso de reducción de datos y no tienen un significado físico real (la concentración no puede ser negativa). Comprobamos que el ruido está centrado en cero y tiene una distribución aproximadamente normal, calculamos su desviación estándar y tomamos 3 desviaciones estándar para llegar a la probabilidad del 99 %. La **Tabla 11** indica los límites de detección de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para los sensores situados en IAA-CSIC y ETSI-IT-UGr para distintos periodos de promediado.

Tabla 11. Límites de detección en $\mu g/m^3$.

	IAA-CSIC		ETSIIT-UGr	
	$PM_{2.5}$	PM_{10}	$PM_{2.5}$	PM_{10}
INSTANTÁNEAS	11.6	31.2	9.7	23.9
10 MINUTOS	6.7	18.0	5.6	13.8
1 HORA	2.7	7.3	2.3	5.6
1 DÍA	0.6	1.5	0.5	1.2

En comparación, el límite de detección diezminutal del TEOM es de $0.01 \mu g/m^3$.

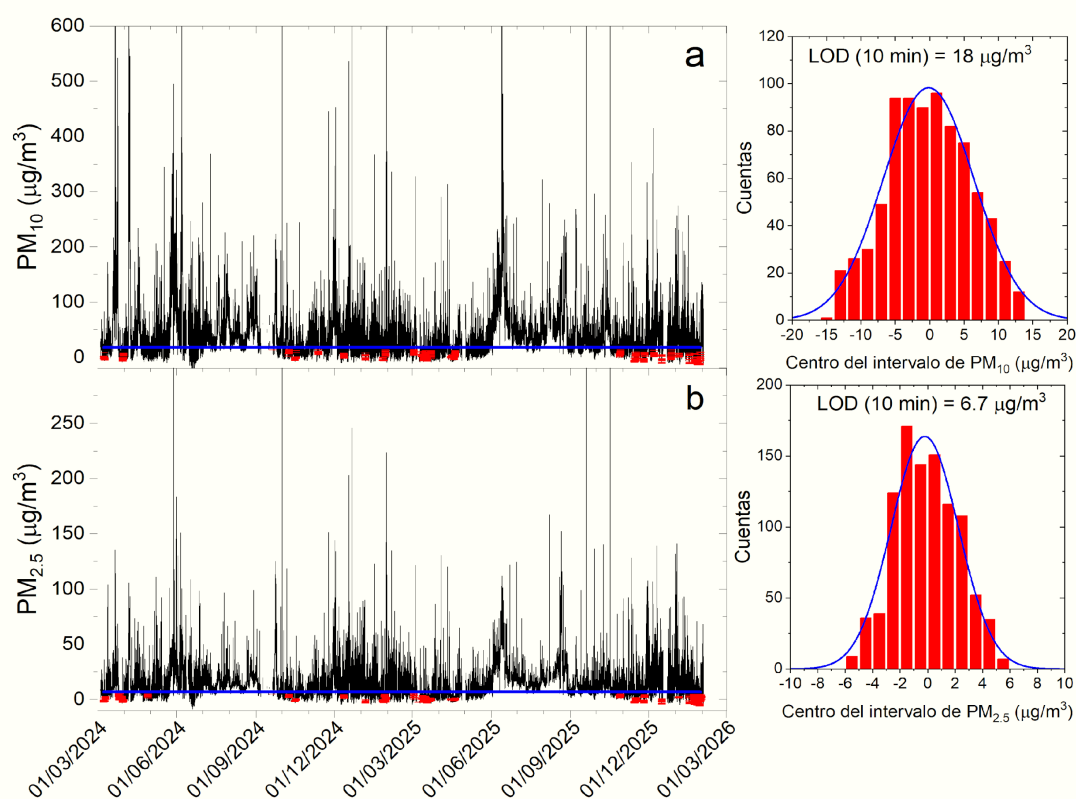


Figura 19. Estimación del límite de detección (LOD) a 10 minutos de PM_{10} (panel a) y $PM_{2.5}$ (panel b) para el sensor del IAA-CSIC. Las líneas negras muestran las medidas calibradas, los símbolos rojos la línea base (datos de días con lluvia y sin intrusión de polvo sahariano entre las 2:00 y las 5:00 AM y carentes de tendencia), y la línea azul gruesa el límite de detección, calculada como 3 veces la desviación estándar de la línea base. Los histogramas a la derecha corresponden a las series de línea base y se comparan con la distribución gaussiana (línea azul fina).

4.1.4. Promedios diarios

La **Figura 20** muestra las series de promedios diarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} para todos los sensores fijos. puede observarse como muchas de las superaciones de los valores de referencia están relacionadas con intrusiones de polvo sahariano. Estas medidas no se corrigen usando las medidas de una estación de fondo según marca la Directiva 08/50/CE, sino han sido excluidas totalmente del conteo de días con superaciones de los umbrales. Por ello las fracciones indicadas en la **Tabla 12** han de considerarse como límites inferiores, es decir, que son menores o iguales que las fracciones reales. La mayor frecuencia de superaciones en invierno está relacionada con el uso de calefacciones y quemas de biomasa (ver análisis estacional).

En la **Tabla 12** puede verse como la fracción de superaciones del promedio diario de PM_{10} establecido en la legislación actual está por debajo del límite del número de superaciones permitidas en el IAA-CSIC, en la ETSIT-UGr y en el Colegio Cristo de la Yedra. En esta última localización se producen picos intensos debidos al traslado de los alumnos y las actividades en el patio en el periodo lectivo (**Figura 9**), que aunque son de corta duración elevan ligeramente las medias diarias por encima de las registradas en las otras localizaciones (**Figura 20**). Es destacable que en todos los casos el número de superaciones está por encima de los umbrales establecidos por la legislación que previsiblemente entrará en vigor en 2030 (5%) y que en un 20–30 % de los días hay superaciones del nivel de $PM_{2.5}$ recomendado por la OMS. Conviene resaltar de nuevo que las medidas que presentamos en este estudio no están certificadas según los estándares técnicos europeos y por tanto no son válidas a la hora de establecer si se superan los umbrales legales. Sin embargo, al haber anclado las medidas de los sensores a un sensor de medida equivalente, lo que estas comparaciones nos indican es que podría haber problemas en los sensores de la RVCCA y que sería conveniente analizar estas discrepancias más en profundidad.

Tabla 12. Fracción de días en un año en los que las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ (filtradas) superan los umbrales establecidos en la legislación actual y la próxima, y los umbrales recomendados por la OMS.

UMBRALES (FRACCIÓN DE SUPERACIONES ANUALES)	PM_{10}			$PM_{2.5}$		
	ACTUAL ^a	2030 ^b	OMS ^c	ACTUAL ^a	2030 ^b	OMS ^c
	50 $\mu g / m^3$ (<10%)	45 $\mu g / m^3$ (<5%)	45 $\mu g / m^3$ (n.a.)	(n.d)	25 $\mu g / m^3$ (<5%)	15 $\mu g / m^3$ (n.a.)
ETSIIT-UGr	9.4%	13.6%	13.6%	—	6.6%	24.8%
IAA-CSIC	6.0%	9.9%	9.9%	—	4.0%	21.2%
C. de la Yedra	7.8%	11.5%	11.5%	—	8.1%	23.7%
Granada-Norte	0.8%	1.1%	1.1%		0.2%	2.8%
Palacio de Congresos	0.3%	0.9%	0.9%	—	0.5%	11.0%

^a Directiva (UE)2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. La legislación nacional que transpone la directiva europea y define los límites actuales es el Real Decreto 102/2011, relativo a la mejora de la calidad del aire. No hay un promedio diario umbral definido para $PM_{2.5}$.

^b Directiva (UE) 2024/2881 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2024, sobre la calidad del aire ambiente y una atmósfera más limpia en Europa

^c Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: Materia particulada ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono (WHO 2021). La OMS no establece un número máximo de superaciones anuales.

En la **Figura 21** puede verse como los datos obtenidos con el SDS011 situado en de la ETSIIT-UGr son sistemáticamente más altos que los obtenidos en las estaciones de la RVCCA de la Junta de Andalucía. Una parte importante de la diferencia es atribuible a la calibración del SDS011 con el TEOM de la unidad móvil del IISTA, ya que los datos de PM_{10} de los BAM de la RVCCA son sistemáticamente más bajos que los medidos por el TEOM (factor 0.65–0.72). La **Figura 22** muestra la misma comparación que el panel inferior de la **Figura 21** en forma de gráficos de dispersión de unas series frente a otras. Las regresiones lineales muestran que mientras que la diferencia entre los valores de las dos estaciones de la RVCCA por un lado, y entre el SDS011 de la ETSIIT-UGr y el TEOM de la unidad móvil por otro es, en ambas comparaciones, un factor cercano a 1 (**Tabla 13**), los valores de las dos estaciones se diferencian en factores menores que 1 de los del SDS011. Las estaciones de la RVCCA están en localizaciones de fondo muy separadas, mientras que la estación de la ETSIIT-UGr es de fondo y está próxima a Granada-Norte. Los datos de la unidad móvil del IISTA combinan datos urbanos de fondo (Facultad de Farmacia, sede IISTA) y de tráfico (Facultad de Ciencias, Facultad de Bellas Artes, Biblioteca PTS). Es importante destacar que los datos de 2025 y 2026 de las estaciones de la RVCCA no están corregidos con los factores de corrección definitivos. La **Tabla 13** muestra los factores de comparación entre el los sensores SDS011, el TEOM y los BAM para el periodo completo de este proyecto y para el año 2024, para el cual los datos de los BAM se consideran definitivos.

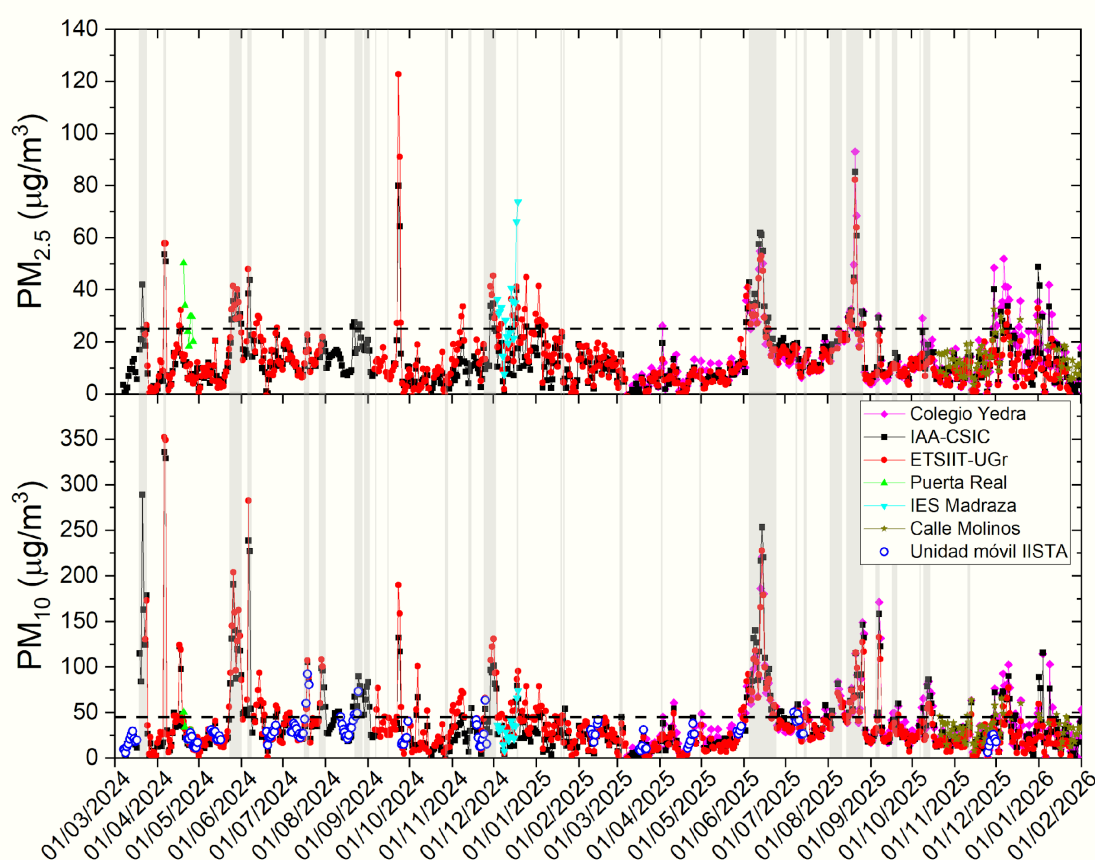


Figura 20. Promedios diarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} de todos los sensores fijos entre marzo de 2024 y febrero de 2026 junto con las medidas del TEOM de la unidad móvil del IISTA (solo PM_{10} , círculos azules). Las bandas grises indican los periodos de intrusión de polvo sahariano, dentro de los cuales las medidas no se tienen en cuenta en el análisis. Las líneas discontinuas indican los valores de referencia de la Directiva (UE) 2024/2881.

La **Figura 23** muestra los cocientes de promedios diarios de $PM_{2.5}/PM_{10}$ obtenidos con dos sensores SDS011 y con BAM de la RVCCA de la Junta de Andalucía. Además de una gran variabilidad, existe un aparentemente un ciclo estacional con una disminución de $PM_{2.5}$ relativa a PM_{10} en verano. Esto indica que la fracción de partículas finas (diámetro inferior a 2.5 micras) disminuye en verano con respecto a las partículas de diámetro inferior a 10 micras (que incluyen a las anteriores). Esta variación estacional en la distribución de tamaños del aerosol en Granada responde a una mayor presencia de partículas gruesas de origen mineral en verano y al incremento de partículas de origen antropogénico en invierno (Casquero Vera et al. 2016). Los sensores SDS011 también captaron esta variación.

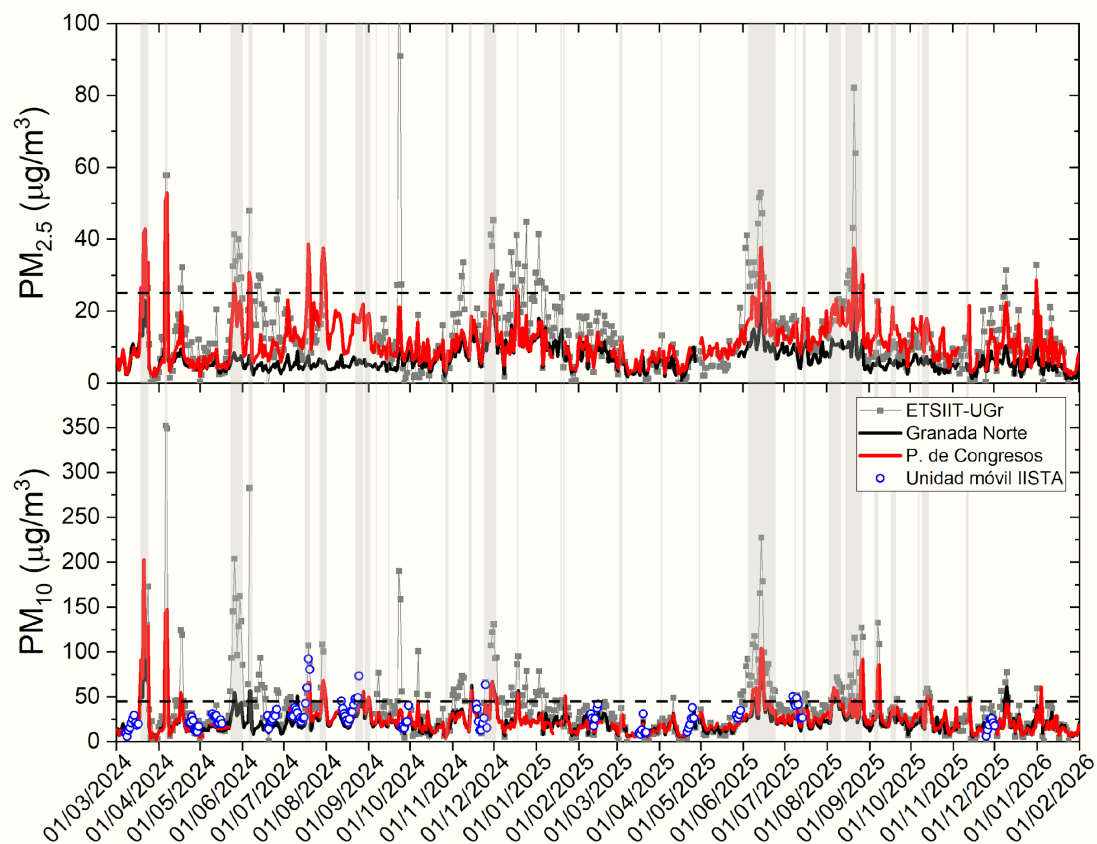


Figura 21. Promedios diarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} del sensor situado en la ETSIIT-UGr (cuadrados grises) y de las estaciones de la RVCCA de la Junta de Andalucía (líneas rojas y negras) entre marzo de 2024 y febrero de 2026, junto con las medidas del TEOM de la unidad móvil del IISTA (solo PM_{10} , círculos azules). Las líneas discontinuas indican los valores de referencia de la Directiva (UE) 2024/2881.

Tabla 13. Parámetros de las regresiones lineales de los gráficos de dispersión de la Figura 20, en los que se representan los datos de PM_{10} medidos con unos sensores frente a los medidos con otros.

COMPARACIÓN	a	b	R ²
BAM Norte vs SDS011 ETSIIT	0 forzado	0.446 ± 0.002	0.7890
BAM Norte vs SDS011 ETSIIT (2024)	0 forzado	0.368 ± 0.002	0.8064
BAM Congresos vs SDS011 ETSIIT	0 forzado	0.450 ± 0.002	0.6900
BAM Congresos vs SDS011 ETSIIT (2024)	0 forzado	0.365 ± 0.003	0.6686
BAM Congresos vs Norte	0 forzado	1.014 ± 0.003	0.8592
SDS011 IAA vs TEOM	0 forzado	1.022 ± 0.012	0.7502

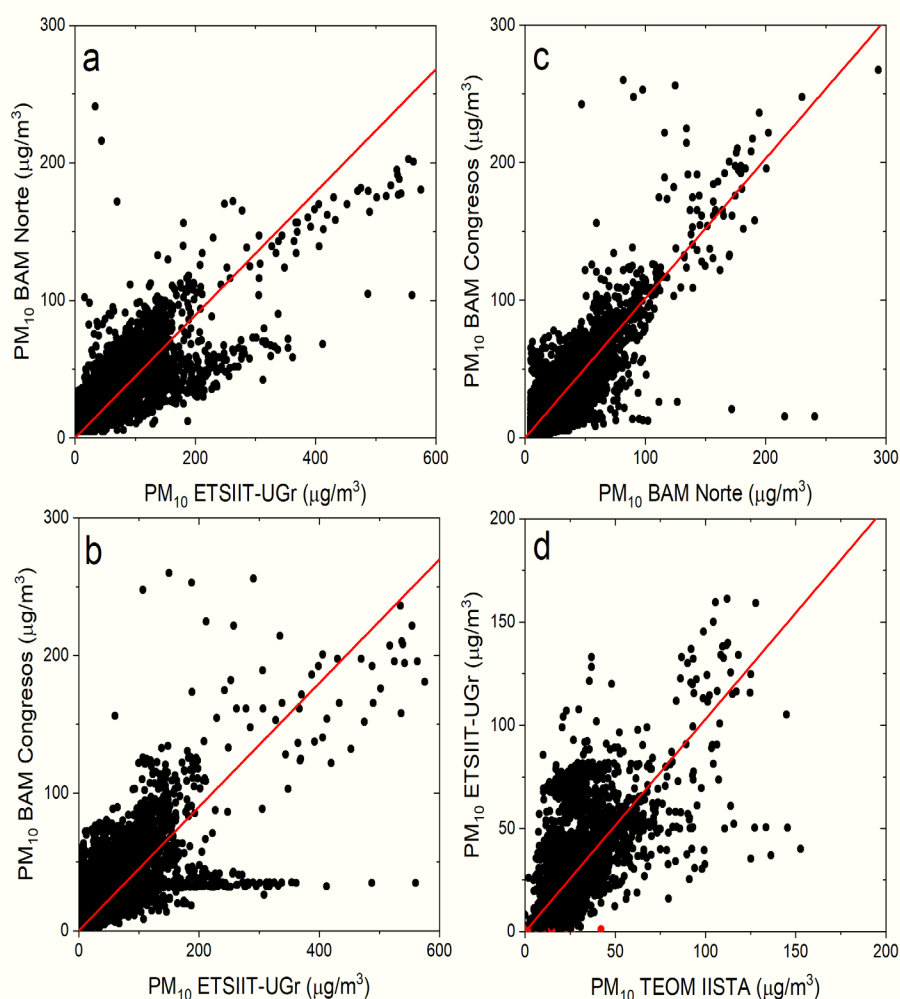


Figura 22. Gráficos de dispersión mostrando la correlación entre las medias horarias de PM_{10} de distintos sensores (puntos negros) y regresiones lineales correspondientes (líneas rojas): Granada-Norte y Palacio de Congressos frente al SDS011 de la ETSIIT-UGr (a y b), estación Granada-Norte frente a estación Palacio de Congressos (c) y SDS011 de la ETSIIT-UGr frente al TEOM. En las comparaciones de las estaciones de la RVCCA con los otros sensores se ha fijado a cero la ordenada en el origen de los ajustes debido a que los datos de las estaciones presentan un límite inferior (de $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Granada-Norte y $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Palacio de Congressos), posiblemente un límite de detección por el que se han sustituido todos los datos inferiores a este, mientras que a ni los del TEOM ni a los de los SDS011 se les ha aplicado esta restricción. La ordenada cero facilita la comparación. Los parámetros de las regresiones lineales y los coeficientes de correlación se incluyen en la [Tabla 13](#).

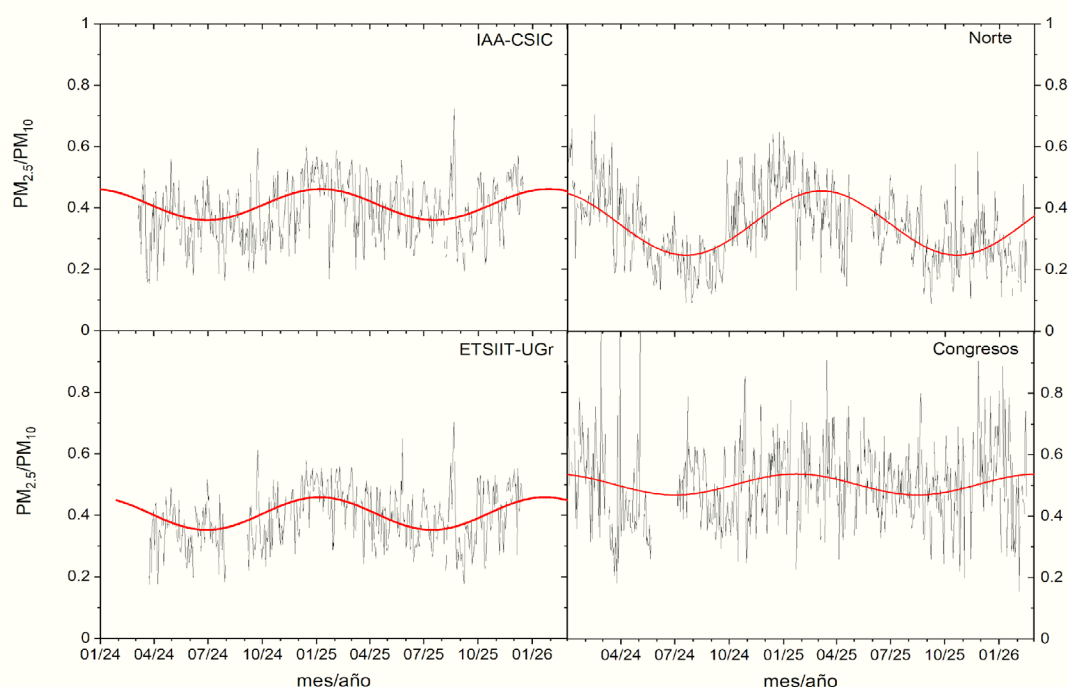


Figura 23. Cociente de promedios diarios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Los paneles de la izquierda corresponden a cocientes de las medidas brutas de los sensores SDS011 en la ETSIIT-UGr y el IAA-CSIC, y los de la derecha a los cocientes de las medidas de las estaciones de la RVCAA de la Junta de Andalucía. Las líneas rojas son ajustes sinusoidales empíricos para resaltar la variabilidad estacional. Puede verse como los sensores predicen bien el ciclo estacional y los máximos en invierno, pero no reproducen correctamente la profundidad del mínimo en verano.

4.1.5. Evolución diaria

Los perfiles diarios promedios por horas muestran generalmente el clásico perfil bimodal de contaminación urbana, aunque con ciertas variaciones entre puntos de medida y estación del año (**Figura 24**). Puede verse como al eliminar los datos afectados por intrusiones de polvo sahariano los promedios disminuyen. La amplitud de la variabilidad de los datos (zonas sombreadas en la **Figura 24**) también disminuye significativamente. La **Figura 25** muestra los perfiles diarios promedios filtrados separados por estaciones. Los valores de $PM_{2.5}$ y PM_{10} son más elevados en invierno, posiblemente como resultado del funcionamiento de calderas de combustión de gasoil y quemas de biomasa en la vega. La bimodalidad es significativamente más marcada en otoño e invierno y prácticamente desaparece en verano. En invierno el pico de la mañana y la tarde-noche son prácticamente de la misma altura.

4.1.6. Evolución semanal

Los perfiles semanales promedios por días de los datos filtrados muestran efecto fin de semana en PM_{10} , con disminuciones de las concentraciones de partículas durante el sábado y el domingo con respecto al máximo a mitad de la semana de entre un 10 % y un 30 % dependiendo de la estación (**Figura 26**). La situación de $PM_{2.5}$ es más compleja, dado que a esta fracción no solo contribuyen partículas primarias directamente relacionadas con el tráfico, sino que también incluye partículas secundarias cuya formación está favorecida por la disminución de óxidos de nitrógeno y el consiguiente aumento del ozono que ocasiona la reducción en las emisiones. Es por ello que se puede producir una compensación entre la disminución de partículas primarias y el aumento de secundarias. Esto explicaría la ausencia de una tendencia clara en los perfiles promedio semanales $PM_{2.5}$ en IAA-CSIC y ETSIIT-UGr.

Al separar los promedios semanales por estaciones emergen distintos perfiles (**Figura 27**). Solo en primavera y verano se observa el mismo comportamiento en las dos estaciones, con un máximo entre semana y un mínimo en el fin de semana, tanto en PM_{10} como en $PM_{2.5}$, aunque en este último el perfil es prácticamente plano en primavera en IAA-CSIC y en ETSIIT-UGr.

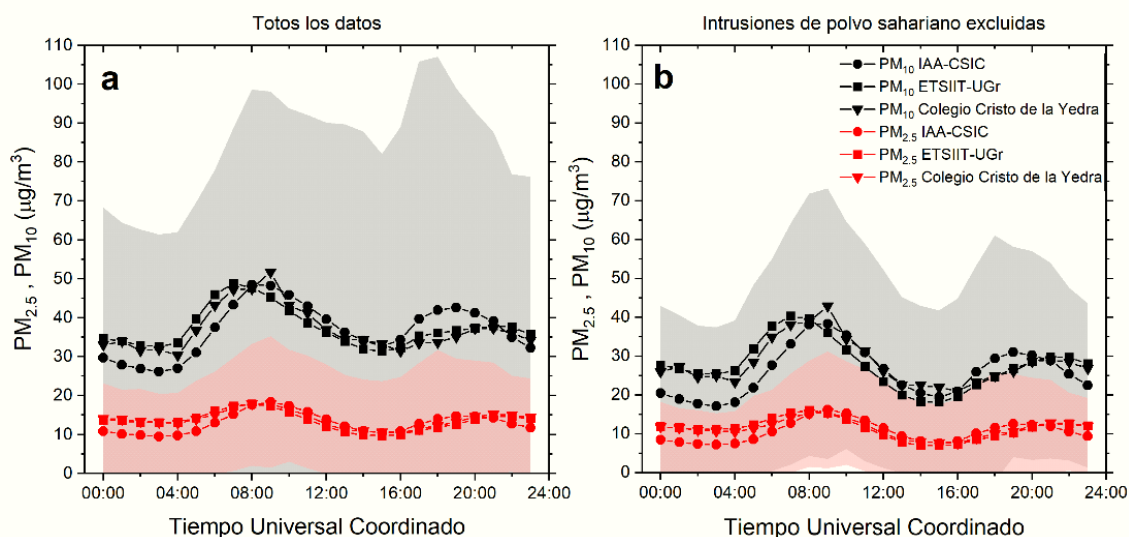


Figura 24. Perfiles diarios promedio por horas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para las series obtenidas en el IAA-CSIC, la ETSIIT-UGr y el Colegio Cristo de la Yedra. Se muestra los perfiles promedio de datos sin filtrar (a) y aplicando el filtro de intrusiones de polvo sahariano. Las áreas sombreadas indican la desviación estándar de los datos diezminutales del IAA-CSIC para cada promedio horario.

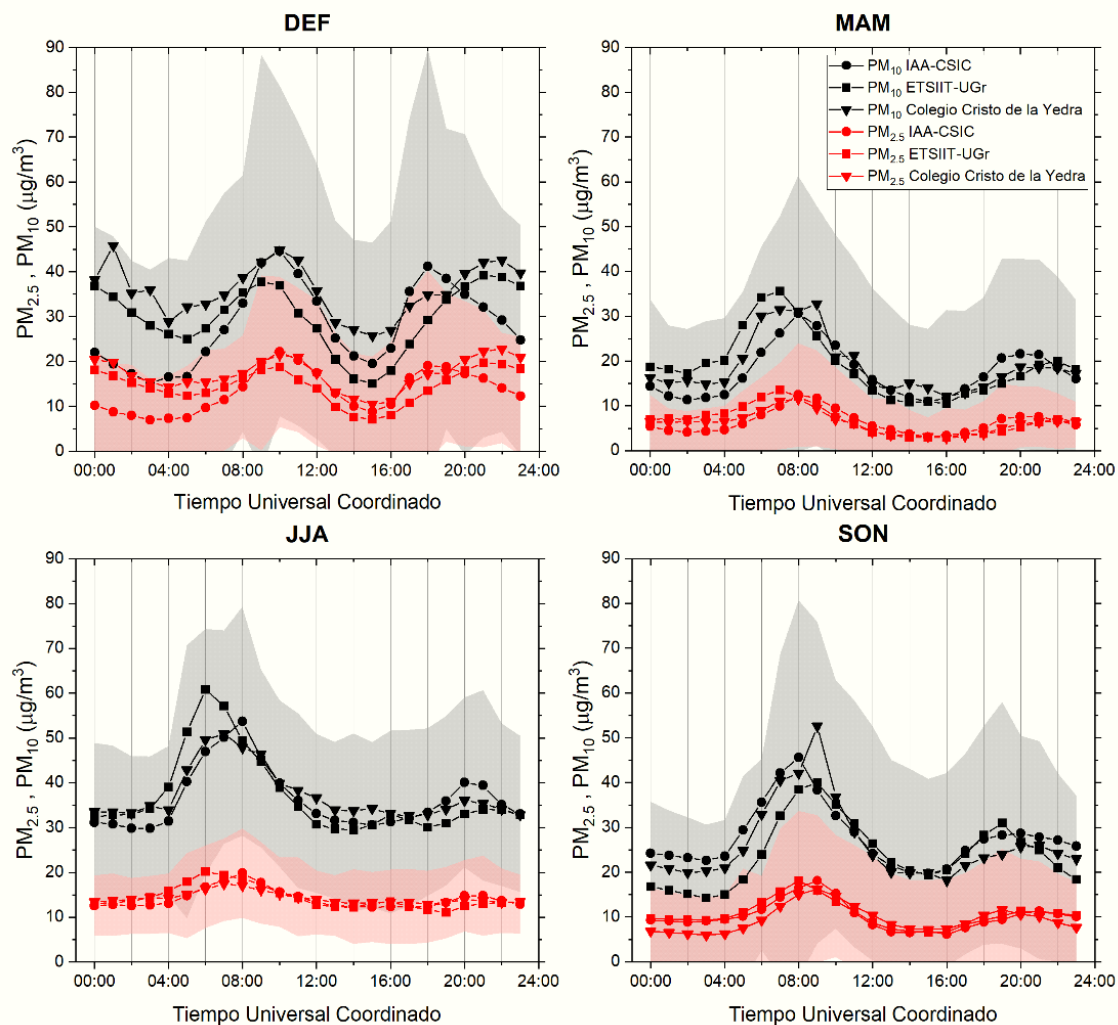


Figura 25. Perfiles diarios promedio por horas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para las series filtradas de los sensores en el IAA-CSIC, la ETSIIT-UGr y el Colegio Cristo de la Yedra, separadas por estaciones: invierno(DEF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON). Las áreas sombreadas indican la desviación estándar de los datos diezminutales del IAA-CSIC para cada promedio horario.

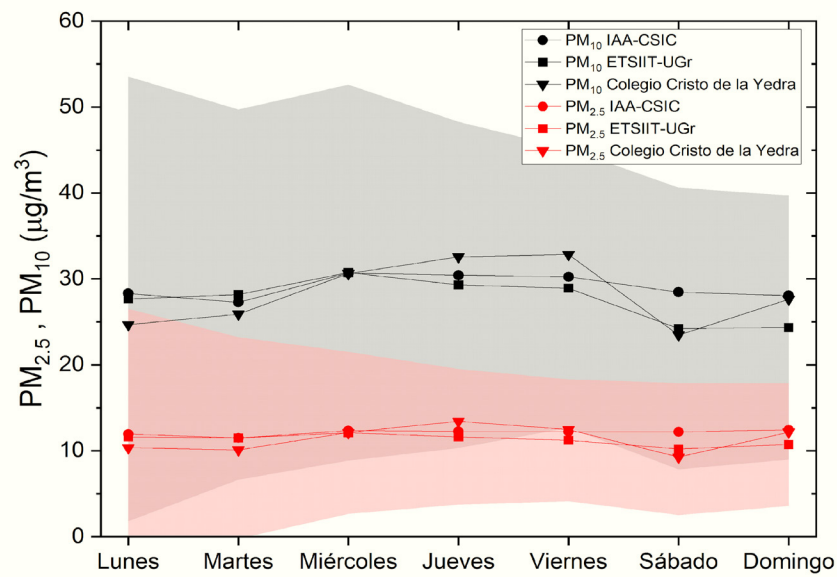


Figura 26. Perfiles semanales promedio de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para las series obtenidas en el IAA-CSIC, la ETSIIT-UGr y el Colegio Cristo de la Yedra. Solo se muestran datos filtrados. Las áreas sombreadas indican la desviación estándar de los datos diarios del IAA-CSIC para cada promedio horario.

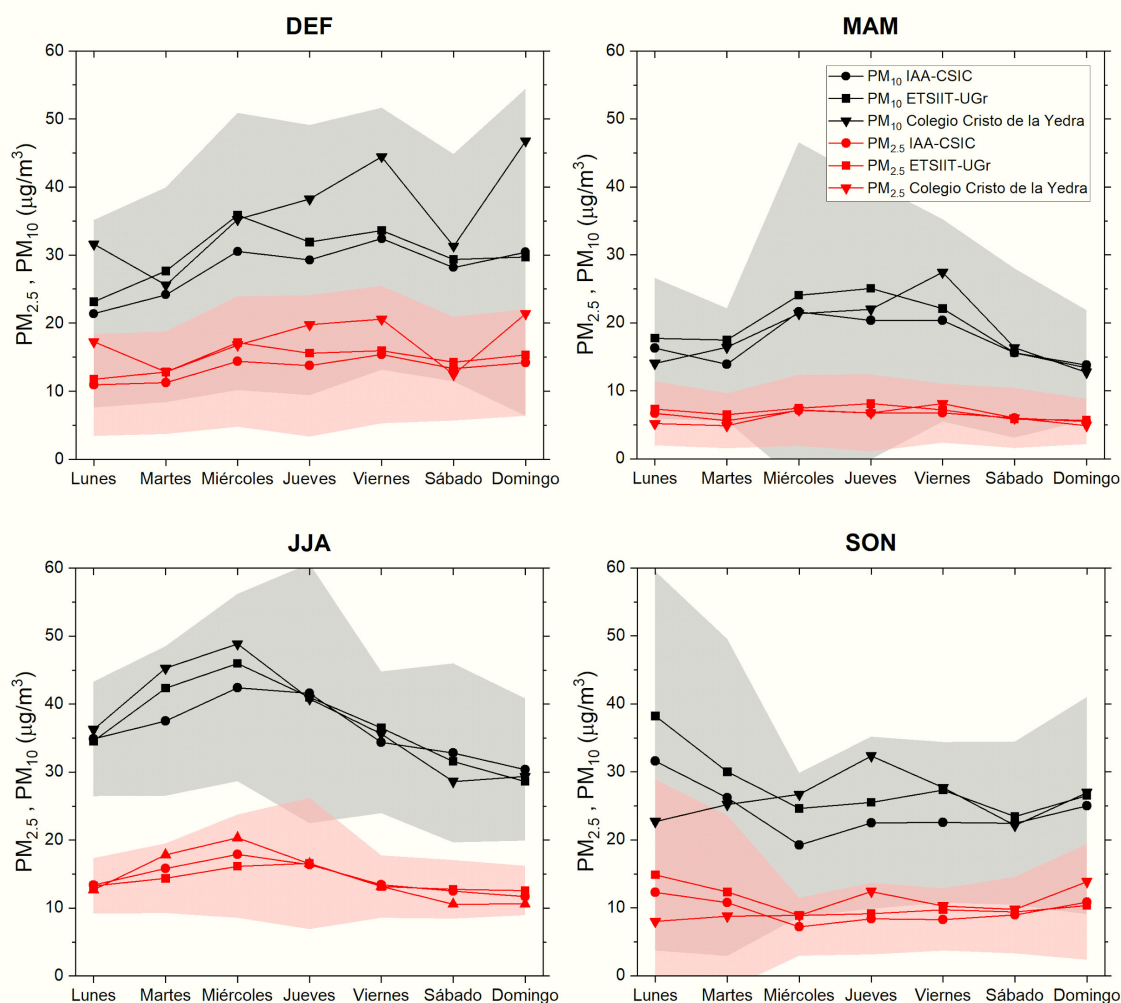


Figura 27. Perfiles semanales promedio por horas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para las series filtradas de los sensores en el IAA-CSIC, la ETSIIT-UGr y el Colegio Cristo de la Yedra, separadas por estaciones: invierno(DEF), primavera (MAM), verano (JJA) y otoño (SON). Las áreas sombreadas indican la desviación estándar de los datos diarios del IAA-CSIC para cada promedio horario.

4.1.7. Evolución anual

La **Figura 28** y la **Figura 29** muestran cómo la variación anual o «climatología» de PM_{10} y $PM_{2.5}$ consiste en una oscilación semianual con dos máximos (invierno y verano) y dos mínimos (otoño e invierno). El máximo de invierno está relacionado con la acumulación de emisiones (tráfico, calderas, quemas de biomasa) favorecida por inversiones térmicas, mientras que el de verano se debe a la resuspensión de PM_{10} bajo condiciones de calor y sequedad extremos, y a la formación fotoquímica de aerosoles secundarios ($PM_{2.5}$). En primavera y otoño la inestabilidad atmosférica fa-

vorece la dispersión de los contaminantes, y las lluvias arrastran los contaminantes y los depositan en la superficie. Puede verse como las calimas contribuyen fundamentalmente a la concentración de PM_{10} en primavera y verano.

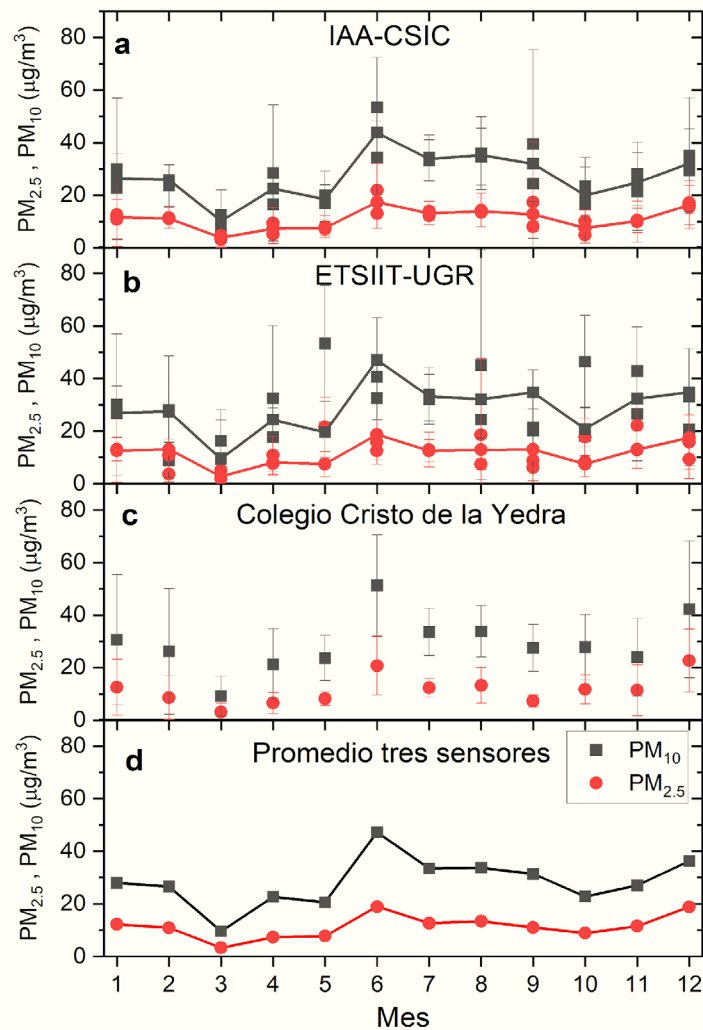


Figura 28. Perfiles anuales de promedios mensuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para las series filtradas de los sensores en el IAA-CSIC (a), la ETSIIT-UGr (b) y el Colegio Cristo de la Yedra (c). Las líneas sólidas gruesas en los paneles a y b indican los perfiles climatológicos (promedios de todos los valores diarios en los meses de enero, febrero, etc) de las estaciones con dos años de medidas (IAA-CSIC y ETSIIT). Las barras de error que acompañan a los promedios mensuales indican la desviación estándar de los promedios diarios. También se muestran los promedios mensuales de los tres sensores (d).

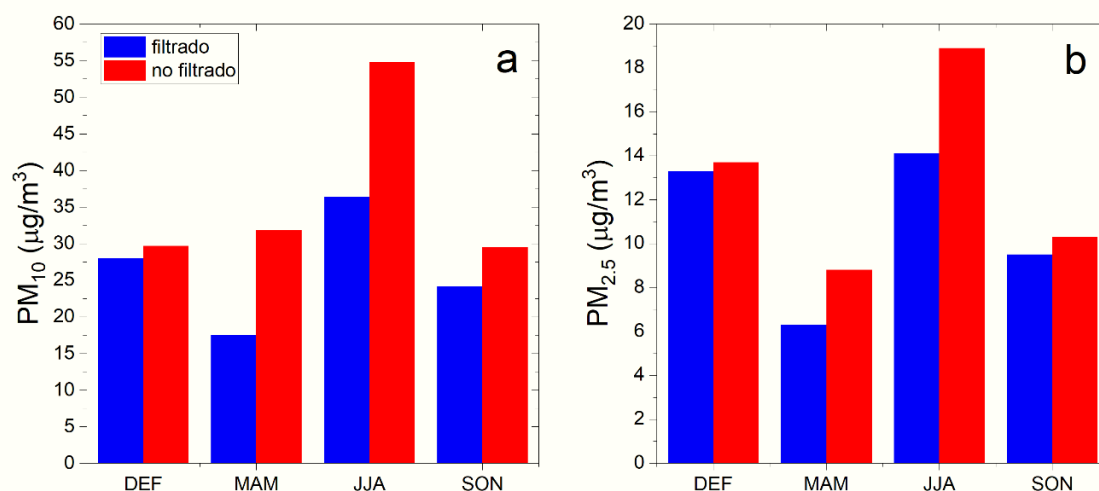


Figura 29. Perfiles anuales de promedios estacionales de PM_{10} (panel a) y $PM_{2.5}$ (panel b) para las series incluyendo todos los datos (rojo) y excluyendo los datos de calimas (azul) para el sensor SSD011 situado en el IAA-CSIC.

4.1.4. Promedios anuales

Los promedios de PM_{10} y $PM_{2.5}$ para el periodo de medida (03/2024–02/2026) y para el año completo 2025 se muestran en la [Tabla 14](#). Puede verse como en todos los casos los promedios anuales de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en 2025 están por debajo de los límites legales actuales ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente). Sin embargo, los promedios anuales de los SDS011 superan los límites legales que entrarán en vigor próximamente ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente), mientras que los promedios de 2025 de las estaciones de la RVCCA están justo en el límite (Palacio de Congressos) o ligeramente por debajo (Granada Norte) de estos nuevos límites. Las recomendaciones de la OMS se superan en todos los casos ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabla 14. Promedios anuales de $PM_{2.5}$ y PM_{10} comparados con promedios registrados por las estaciones de la RVCCA.

	PERIODO COMPLETO (03/2024-02/2026)				2025			
	PM_{10} ($\mu g / m^3$)		$PM_{2.5}$ ($\mu g / m^3$)		PM_{10} ($\mu g / m^3$)		$PM_{2.5}$ ($\mu g / m^3$)	
	Filtrados	Todos	Filtrados	Todos	Filtrados	Todos	Filtrados	Todos
ETSIIT-UGr	28.1	37.4	11.5	13.6	25.9	31.9	10.8	12.4
IAA-CSIC	25.8	36.7	10.6	12.9	26.2	33.9	11.1	13.2
Granada-Norte ^a	18.8	22.7	6.5	7.1	18.4	21.7	6.5	7.0
Congresos ^a	19.3	24.1	9.6	11.4	19.6	23.1	10.1	11.2

^a Los analizadores automáticos requieren un factor de ajuste para equiparar sus resultados al método de referencia gravimétrico. Los datos definitivos de 2025 de $PM_{2.5}$ y PM_{10} con esta corrección se publicarán en 2026. Los datos de 2025 actualmente disponibles han sido corregidos con los factores de 2024 (Granada-Norte: PM_{10} 0.96, $PM_{2.5}$ 0.89; Palacio de Congressos : PM_{10} 1.04, $PM_{2.5}$ 1.05),

4.2. Medidas móviles

4.2.1. Series completas y resumen estadístico

Se han realizado 39 salidas de muestreo, 10 durante la mañana y 29 durante la tarde. Durante la mañana se han obtenido un total de 366 puntos, mientras que por la tarde se han registrado 3497 medidas, de las cuales 3175 son datos válidos . La distribución de puntos por distritos se indica en la **Tablas 15 – 18**.

El objetivo de las medidas móviles es comprobar si la concentración de partículas se distribuye homogéneamente en la zona muestreada (**Figura 8**) y, de lo contrario, identificar zonas en las que la concentración de partículas es más alta debido a una mayor cercanía a las fuentes de emisiones. La **Figura 30** muestra las medidas de $PM_{2.5}$ realizadas con los sensores portátiles durante el máximo de la mañana (panel a) y el de la tarde (panel b). Las salidas de muestreo se han realizado generalmente durante la primavera y el otoño. La comparación con las medidas fijas en la **Figura 30** muestra cómo las medidas de los sensores en distintas localizaciones durante distintas épocas reflejan la variación estacional (**sección 4.1.7**) y diaria (**sección 4.1.5**), por lo que

la comparación de las medidas absolutas no proporciona directamente información sobre la distribución espacial. Para eliminar de las medidas la variabilidad ligada a factores estacionales y meteorológicos, hemos recurrido a una normalización de las medidas móviles a las medidas de uno de los sensores fijos, es decir, se han dividido las medidas móviles entre las medidas en un punto fijo (el IAA-CSIC o la ETSIT-UGr), de forma que los resultados se presentan de forma relativa a este punto. Debido a que el sensor fijo registra las variaciones temporales en el mismo lugar, al realizar esta normalización se está eliminando la variación temporal, permaneciendo en los datos sólo las diferencias relacionadas con la distribución espacial de la contaminación. Al realizar esta normalización es esencial eliminar de las series los datos que son esencialmente ruido, especialmente en el caso de los valores de normalización. Para esto, pueden eliminarse todos aquellos valores tanto de las medidas móviles como de las series en los puntos fijos que queden por debajo del LOD de medidas instantáneas (Tabla 11). Sin embargo, este es un filtrado demasiado drástico ya que elimina una gran cantidad de datos. El LOD es un límite estadístico, no una barrera física. Cuando una tendencia real en un evento de contaminación cruza el LOD, esto significa que por encima de esta la señal es lo suficientemente fuerte para distinguirse del ruido con confianza, mientras que por debajo la señal existe pero está al nivel del ruido, por lo que no podemos aislarla con certeza. Es además importante destacar que se ha tomado la decisión conservadora de representar los datos con un LOD único debido a la escasez de datos de línea base, cuando en realidad es probable que el LOD ha ido variando a lo largo de los dos años de medidas. En nuestro caso hemos optado por: (i) eliminar todos los puntos de los datos de normalización que están por debajo de una desviación estándar del ruido, y (ii) mantener todos los valores no nulos medidos con los sensores portátiles. La primera decisión maximiza la cobertura, reteniendo datos de los sensores portátiles con buena señal, a riesgo introducir algo de ruido, y la segunda permite mantener datos de los sensores portátiles muy bajos con respecto a los del sensor fijo que son estadísticamente importantes a la hora de realizar el mapeado. El número de datos adquiridos y de valores válidos según estos criterios se indican en las Tablas 15 – 18. Hay que destacar que un mayor porcentaje de datos adquiridos en las mañanas son válidos (99.4 % frente a 61.2 % de cocientes de PM_{10} para la normalización con el sensor del IAA), lo que no sorprende teniendo en cuenta que en esa franja horaria se produce el máximo diario, mientras que en la tarde hay un gran número de datos que no pasan el filtrado, porque durante la primavera y el otoño el máximo secundario de la tarde es significativamente más bajo que el de la mañana (Figura 25).

Tabla 15. Estadísticas por distritos de los datos móviles normalizados con los datos del IAA-CSIC obtenidos durante la mañana.

DISTRITO	DATOS	PM ₁₀	PM _{2.5}								
			Válidos	Media	Mediana	Q1	Q3	Válidos	Media	Mediana	Q1
Albayzín	18	18	1.34	1.12	0.85	1.83	18	2.32	1.70	0.63	2.54
Norte	6	6	1.10	1.06	0.98	1.26	6	0.99	0.99	0.85	1.12
Beiro	168	167	1.04	0.85	0.56	1.35	167	1.22	1.04	0.77	1.52
Chana	2	2	0.51	—	—	—	2	0.78	—	—	—
Ronda	44	44	1.24	0.89	0.66	1.81	44	1.24	1.01	0.80	1.47
Centro	99	98	1.30	0.90	0.66	1.46	97	2.15	1.21	0.93	2.17
Genil	17	17	1.12	0.98	0.67	1.46	17	0.94	0.93	0.66	1.19
Zaidín	12	12	1.06	0.92	0.86	1.24	12	0.91	0.95	0.77	1.02

Tabla 16. Estadísticas por distritos de los datos móviles normalizados con los datos del IAA-CSIC obtenidos durante la tarde.

DISTRITO	DATOS	PM ₁₀	PM _{2.5}								
			Válidos	Media	Mediana	Q1	Q3	Válidos	Media	Mediana	Q1
Albayzín	249	236	1.49	1.20	0.74	1.86	198	1.52	1.46	0.95	2.03
Norte	293	91	1.21	0.94	0.44	1.53	40	1.19	0.97	0.57	1.59
Beiro	678	346	1.26	1.09	0.57	1.73	256	1.26	1.02	0.47	1.72
Chana	511	282	1.70	1.34	0.75	1.98	153	2.59	1.79	1.21	2.96
Ronda	544	327	1.38	1.10	0.70	1.65	267	1.45	1.12	0.83	1.42
Centro	629	468	1.51	1.21	0.79	1.75	460	1.69	1.38	0.92	1.97
Genil	373	229	1.41	1.17	0.68	1.71	192	1.16	1.15	0.82	1.40
Zaidín	220	163	1.41	1.14	0.79	1.79	141	1.02	0.98	0.74	1.20

Tabla 17. Estadísticas por distritos de los datos móviles normalizados con los datos de la ETSIIT-UGr obtenidos durante la mañana.

DISTRITO	DATOS	PM ₁₀	PM _{2.5}								
			Válidos	Media	Mediana	Q1	Q3	Válidos	Media	Mediana	Q1
Albayzín	18	18	0.82	0.72	0.43	0.83	18	1.44	0.77	0.48	1.55
Norte	6	6	1.25	1.24	1.00	1.37	6	1.10	1.18	0.86	1.30
Beiro	168	166	1.02	0.83	0.55	1.17	167	1.08	0.96	0.82	1.15
Chana	2	2	0.28	0.28	0.09	0.47	2	0.36	0.36	0.19	0.53
Ronda	44	44	0.48	0.50	0.37	0.58	44	0.56	0.56	0.46	0.72
Centro	99	98	1.23	0.67	0.51	1.56	99	2.29	0.93	0.62	1.67
Genil	17	17	0.86	0.78	0.46	0.87	17	0.72	0.79	0.47	0.90
Zaidín	12	12	0.84	0.77	0.58	1.13	12	0.72	0.69	0.67	0.80

Tabla 18. Estadísticas por distritos de los datos móviles normalizados con los datos de la ETSIIT-UGr obtenidos durante la tarde.

DISTRITO	DATOS	PM ₁₀	PM _{2.5}								
			Válidos	Media	Mediana	Q1	Q3	Válidos	Media	Mediana	Q1
Albayzín	249	240	1.87	1.57	1.17	2.12	202	2.20	2.03	1.65	2.54
Norte	293	83	1.25	1.20	0.69	1.59	80	1.05	0.86	0.59	1.49
Beiro	678	359	1.65	1.36	0.68	2.21	285	1.41	1.15	0.46	1.95
Chana	511	375	1.24	0.94	0.59	1.53	340	1.17	0.64	0.36	1.17
Ronda	544	177	1.63	1.20	0.57	2.08	163	1.10	0.79	0.25	1.67
Centro	629	258	1.53	1.03	0.59	2.04	227	2.14	1.06	0.54	2.64
Genil	373	186	1.49	1.26	0.86	1.83	129	1.40	1.36	1.02	1.74
Zaidín	220	174	1.84	1.44	0.88	2.33	163	1.42	1.20	0.69	1.81

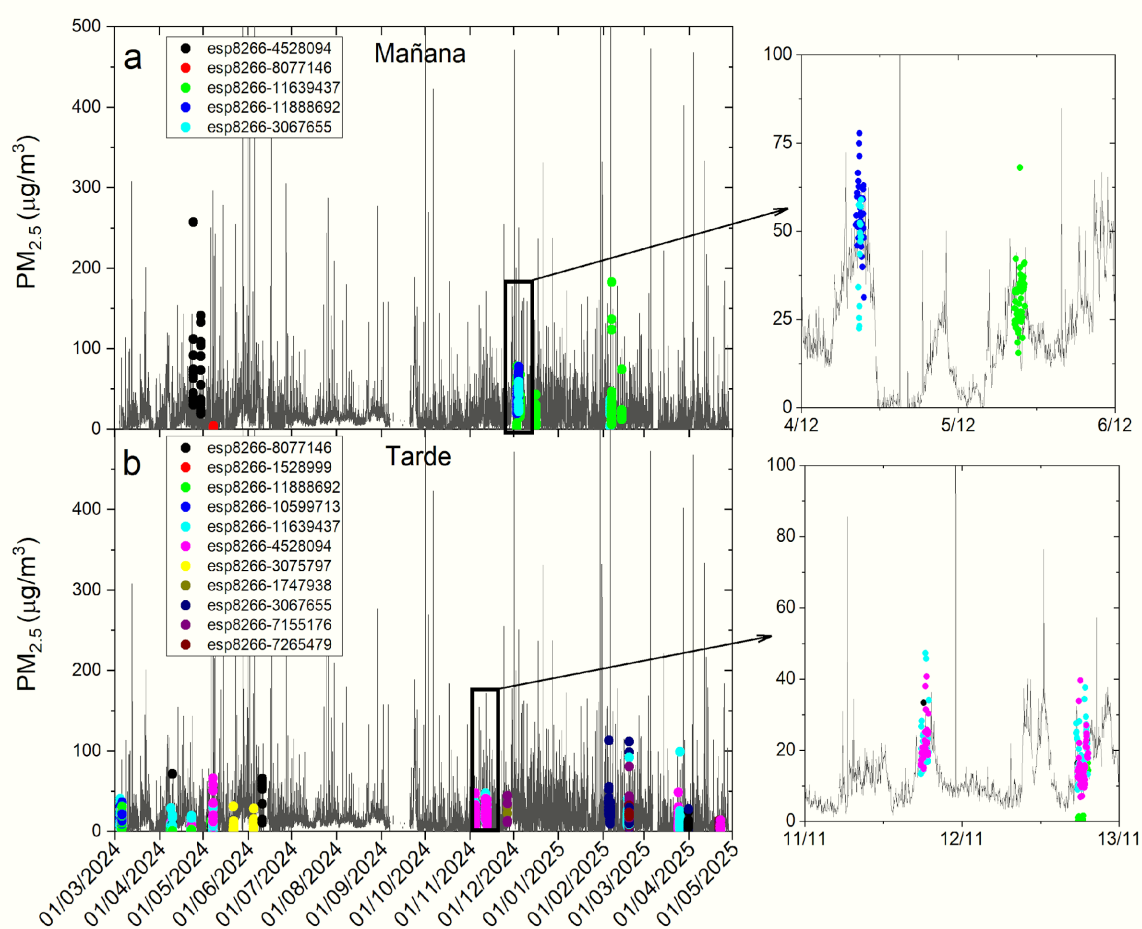


Figura 30. Medidas de $PM_{2.5}$ con sensores portátiles (símbolos) a lo largo del proyecto comparadas con las medidas tres-minutales fijas de $PM_{2.5}$ en el IAA-CSIC (línea gris). Los paneles a y b muestran las medidas realizadas durante la mañana y la tarde, respectivamente. El color de los símbolos identifica al sensor con el que se realizaron las medidas. Los paneles de la derecha muestran ampliaciones en los periodos indicados por rectángulos en las series completas e ilustran la diferencia en los muestreos durante el pico de la mañana y el de la tarde

La **Figura 31** muestra la normalización con los datos del IAA-CSIC de las medidas de $PM_{2.5}$ representadas en la **Figura 30**. La distribución de frecuencias muestra como la mayoría de los cocientes están próximos a 1, aunque existe una cola de cocientes que alcanzan valores altos, indicando que en una fracción importante de los puntos se midieron valores más elevados que los medidos simultáneamente en el IAA-CSIC. Los gráficos correspondientes a los datos normalizados con las medidas en la ET-SIIT-UGr son similares a estos y no se muestran. En este caso los datos están por un lado limitados por la ausencia de medidas del sensor fijo durante tres salidas de muestreo, y por otro incluyen más valores por el LOD más bajo de este sensor.

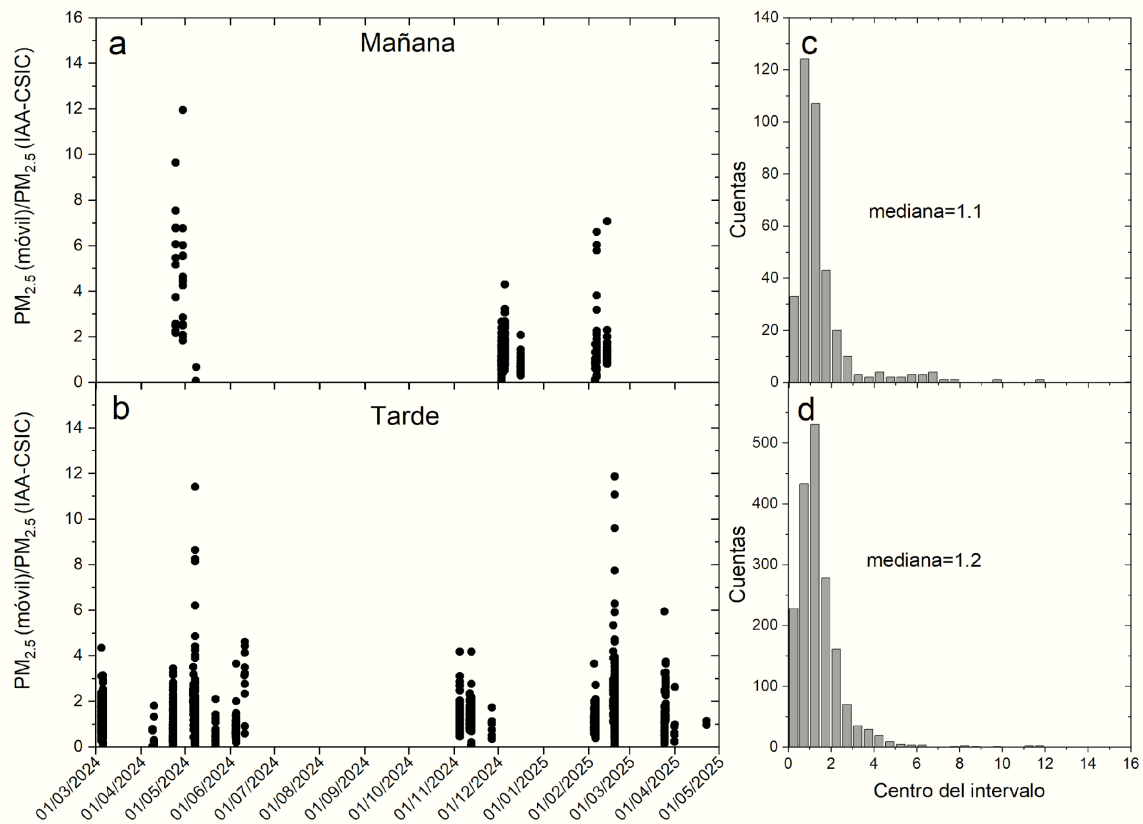


Figura 31. Medidas de $PM_{2.5}$ con sensores portátiles normalizadas con las medidas fijas en el IAA-CSIC (los paneles a y b muestran las medidas realizadas durante la mañana y la tarde, respectivamente). Los paneles c y d muestran la distribución de frecuencias de los cocientes $PM_{2.5} \text{ (móvil)} / PM_{2.5} \text{ (IAA-CSIC)}$ a su izquierda.

4.2.2. Patrones espaciales

Debido al menor número de salidas durante las mañanas, se ha reducido el área de interpolación IDW para los datos de esta franja horaria, evitando así que se produzca una extrapolación especulativa hacia los bordes del área de interés.

Los mapas de valores absolutos (**Figura 32**) muestran valores elevados de $PM_{2.5}$ en el centro y el realejo durante la mañana y la tarde. Durante la tarde también se aprecian valores elevados en varios accesos a la ciudad desde la Circunvalación, en el Zaidín y en la Chana. El mapa matinal de PM_{10} indica valores altos en el entorno de la Avenida Compositor Luis de Narváez y del Camino Bajo de Huétor, la Calle Molinos y el Paseo de la Bomba. En la tarde se observan zonas más extensas con valores de PM_{10} medios y altos, por un lado el arco Albayzin- Centro-Realejo, y por otro el Zaidín.

La variabilidad que se observa en los mapas de la [Figura 32](#) incluye tanto variabilidad espacial como temporal, ya que los datos se han adquirido en diferentes días en distintas épocas del año. Los patrones espaciales emergen en los mapas al realizar las normalizaciones de las medidas móviles a las fijas, como se ha explicado en la sección 3.2.2.4. Los mapas de los valores normalizados de $PM_{2.5}$ ([Figura 33](#) y [Figura 34](#)) muestran un claro patrón espacial en el que las zonas de mayores concentraciones relativas se ubican en el eje Recogidas – Reyes Católicos – Avenida de Madrid. Los cuadriláteros con concentraciones más altas se registran en la Acera del Casino, mitad de Reyes Católicos y en el cuadrilátero Gran Vía-Cárcel Baja-Elvira-Reyes Católicos. El mapa de $PM_{2.5}$ normalizado al IAA-CSIC también sugiere zonas de concentraciones más altas en torno a la calle Pagés en el Albayzín y en la Calle Arabial en el lado norte del parque García Lorca. El eje Recogidas – Reyes Católicos – Avenida de Madrid está menos definido en los mapas de $PM_{2.5}$ de la tarde, probablemente debido a la dispersión más efectiva de contaminantes en esa franja horaria. Por otro lado, debido a su mayor cobertura y densidad de muestreo, los mapas de $PM_{2.5}$ durante la tarde proporcionan más información, mostrando tres zonas de concentraciones elevadas claramente diferenciadas: Gran Vía y Elvira, el entorno de la salida de la circunvalación en la glorieta de Hipercor (donde se encuentra el sensor de 5G City Brain – ZBE Granada) y el eje Villarejo-Carretera de Málaga en la Chana.

Las estadísticas en la [Tabla 16](#) para los datos normalizados al IAA-CSIC muestran como las concentraciones relativas media y mediana medidas en la Chana están en torno a 2 (fundamentalmente por las altas concentraciones en la carretera de Málaga) y son incluso más altas que las registradas en el centro. El mapa de la tarde de datos de $PM_{2.5}$ normalizados a la ETSIT coincide en señalar el comienzo de la carretera de Málaga como una zona de concentraciones altas, y en destacar valores elevados en el Albayzín. Puede verse como los elevados valores medidos en el Realejo ([Figura 32](#)) no aparecen como altas concentraciones relativas en los mapas de valores normalizados, lo que indica que las medidas en esa zona se realizaron en días con concentraciones generalmente elevadas relacionadas con la variabilidad temporal.

Los mapas de PM_{10} normalizados al IAA ([Figura 35](#)) muestran algunos cuadriláteros aislados de concentraciones altas que coinciden en general con las zonas de alto $PM_{2.5}$ y varias agrupaciones de puntos elevados a lo largo de la circunvalación. El mapa de PM_{10} normalizado más informativo es el relativo a la ETSIT-UGR ([Figura 36](#)), donde de nuevo aparecen el centro y el Albayzín con concentraciones relativas elevadas, así como dos zonas del Zaidín, una de ellas pegada a la circunvalación entre Fernando de los Ríos y la Avenida de la Innovación, y otra en la avenida de Dílar.

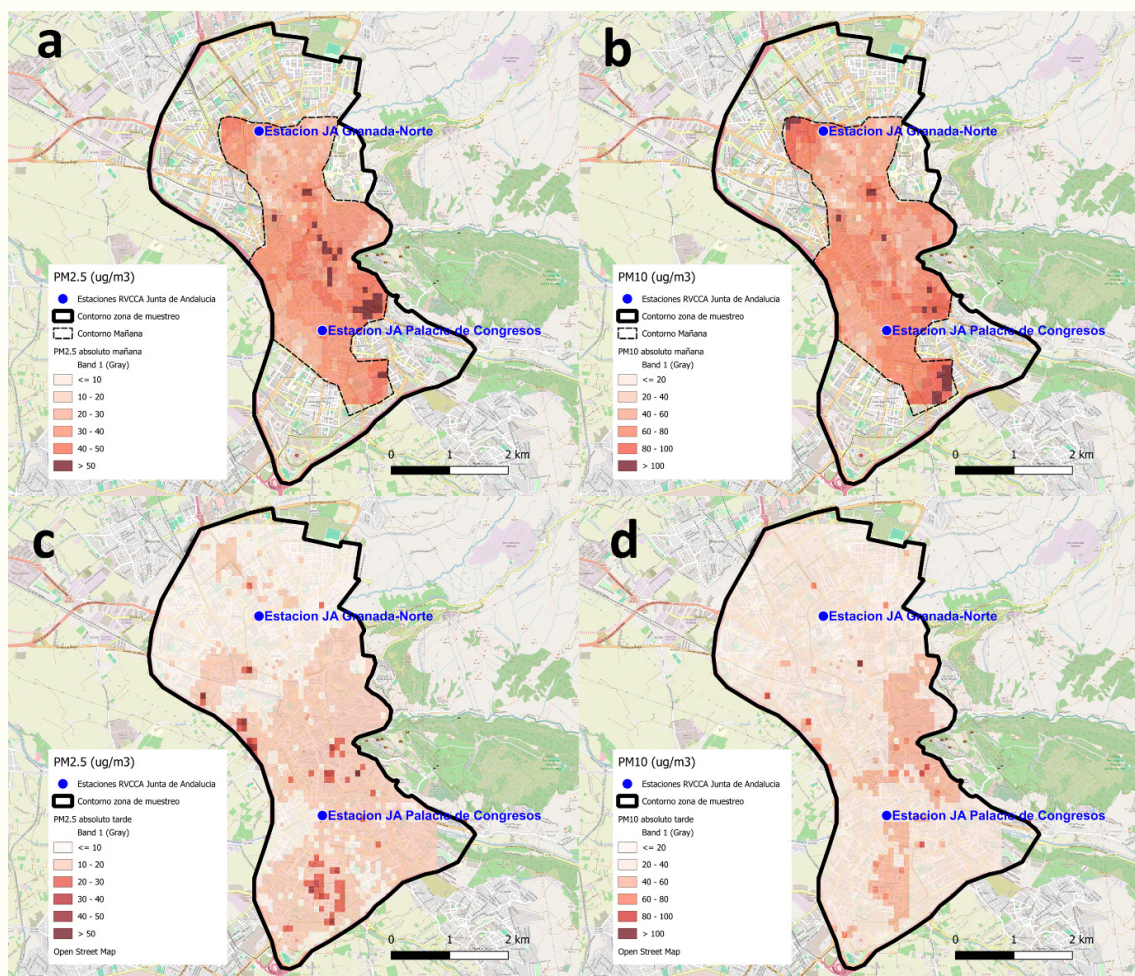


Figura 32. Mapas de valores absolutos de $PM_{2.5}$ (paneles a y c) y PM_{10} (paneles b y d) medidos durante la mañana (a y b) y durante la tarde (c y d).

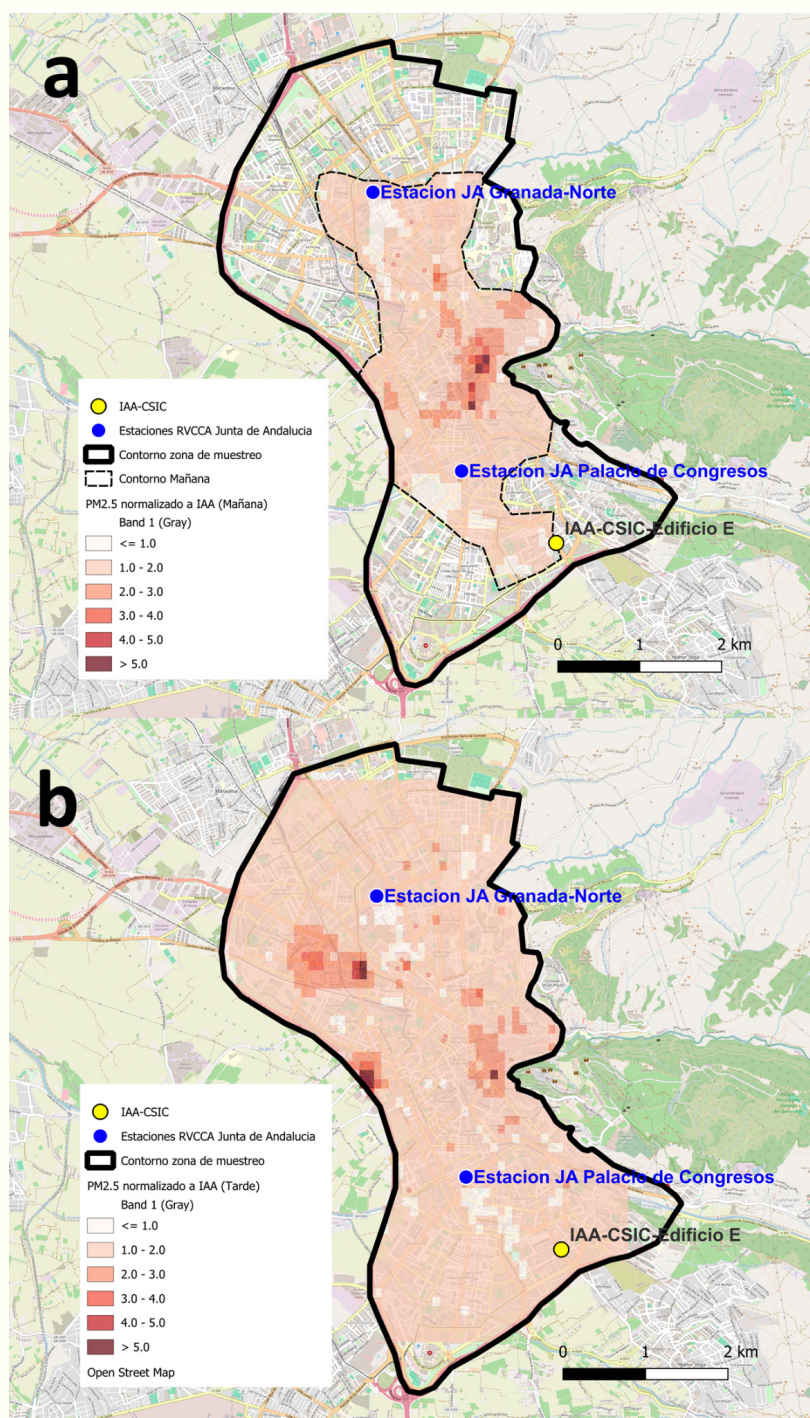


Figura 33. Mapa de la zona muestreada mostrando la interpolación IDW de $PM_{10}(\text{móvil})/PM_{2.5}(\text{IAA-CSIC})$. Los colores indican en qué banda de las seis mostradas en la leyenda se ubican los datos.

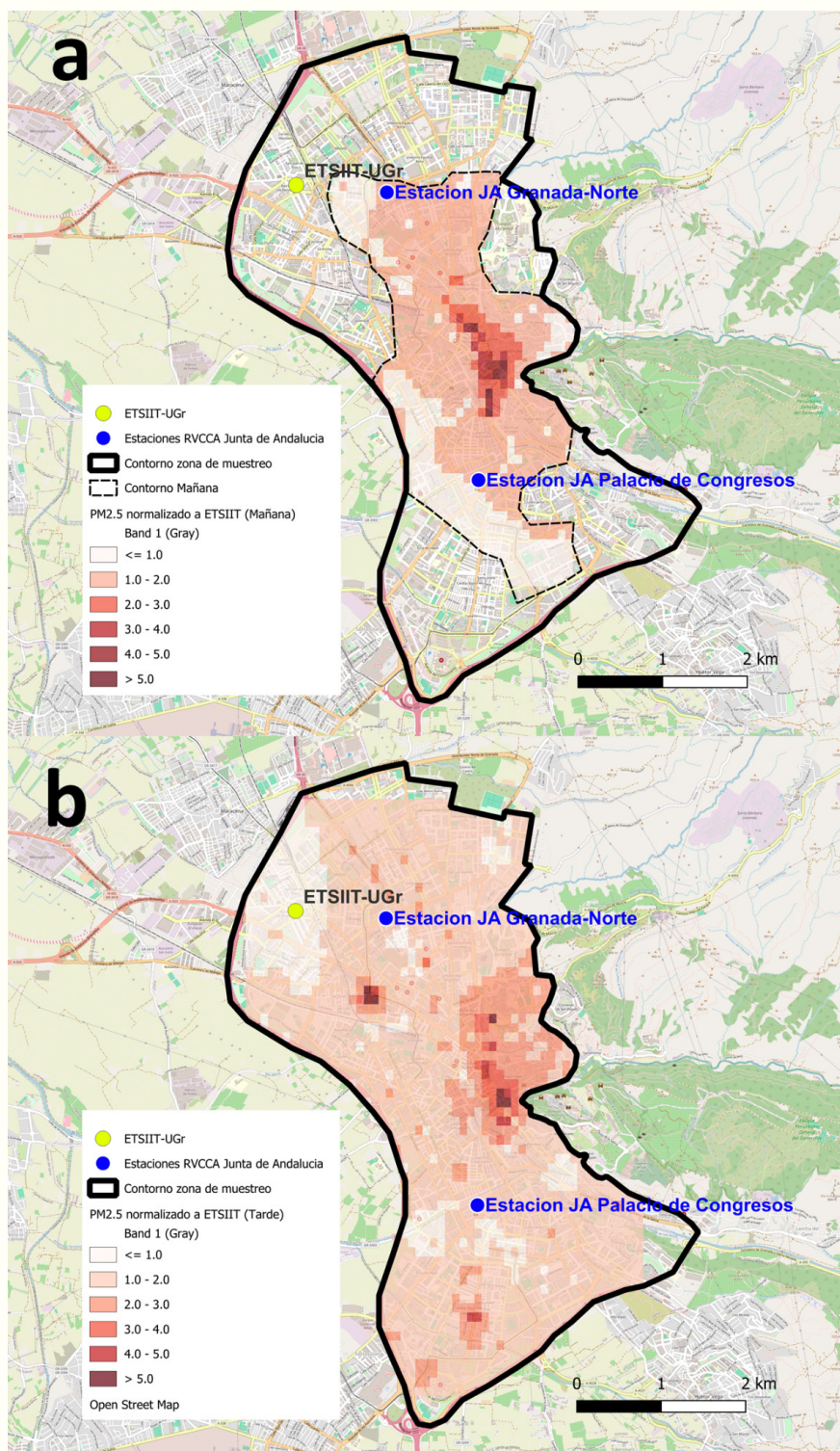


Figura 34. Mapa de la zona muestreada mostrando la interpolación IDW de $PM_{10}(\text{móvil})/PM_{2.5}(\text{ETSIIIT-UGr})$. Los colores indican en qué banda de las seis mostradas en la leyenda se ubican los datos.

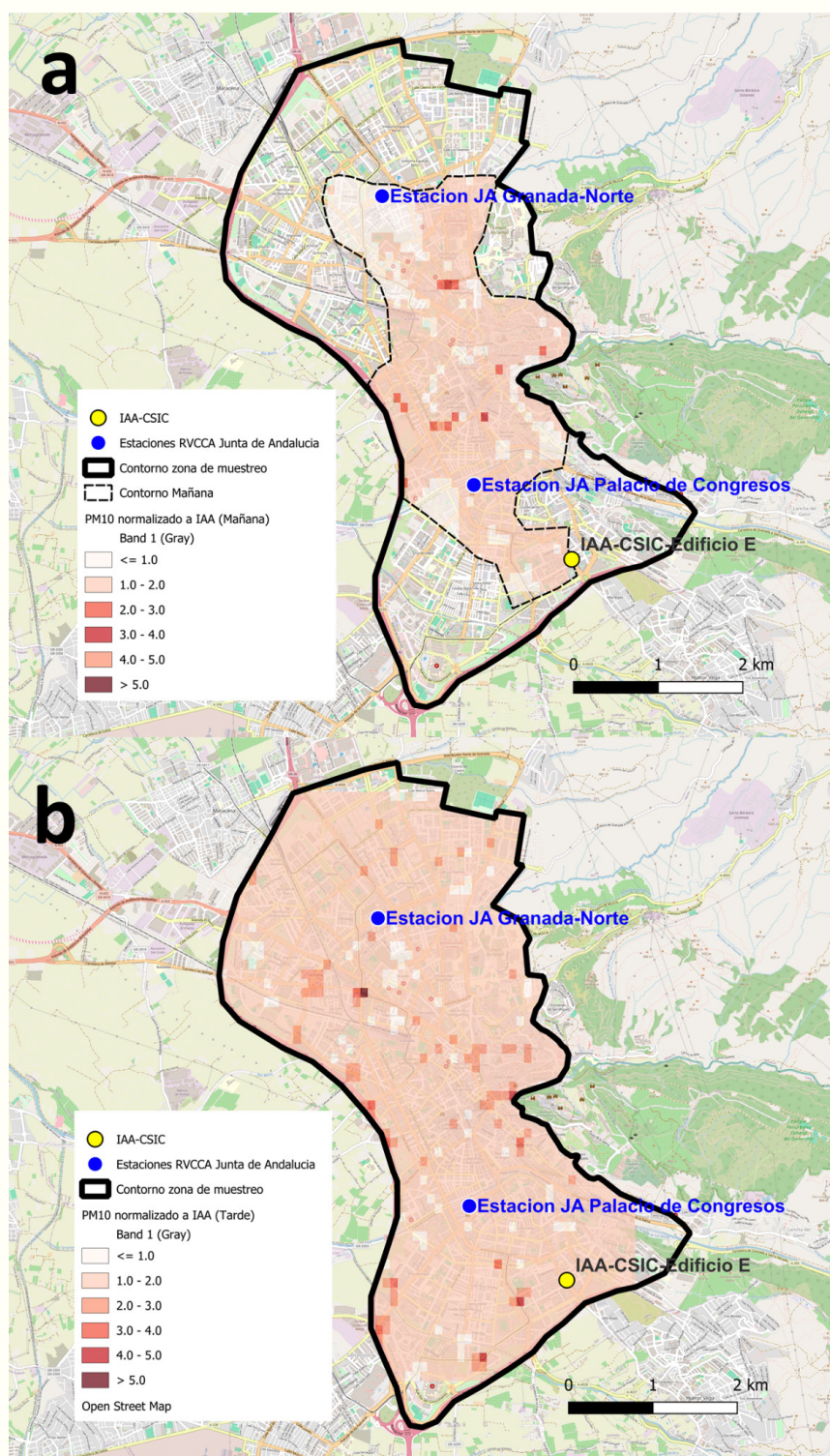


Figura 35. Mapa de la zona muestreada mostrando la interpolación IDW de PM_{10} (móvil)/ $PM_{2.5}$ (IAA-CSIC). Los colores indican en qué banda de las seis mostradas en la leyenda se ubican los datos.

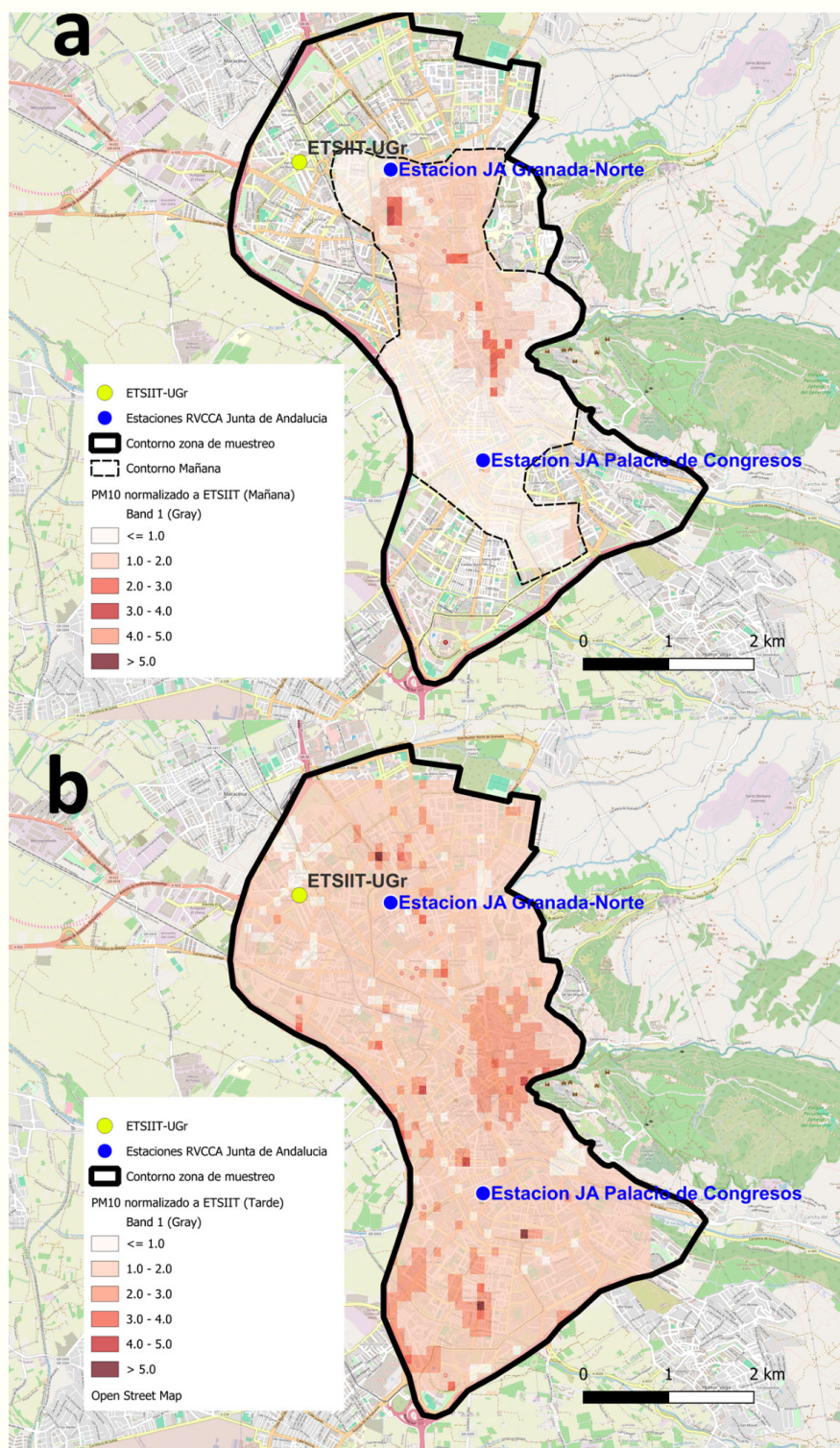


Figura 36. Mapa de la zona muestreada mostrando la interpolación IDW de $PM_{10}(\text{móvil})/PM_{2.5}$ (ETSIIIT-UGr). Los colores indican en qué banda de las seis mostradas en la leyenda se ubican los datos.





05. Discusión

5.1. Interpretación de la evolución diaria, semanal y anual

No nos extenderemos en el análisis de los distintos patrones temporales de las medidas, ya que estos han sido discutidos detalladamente en la literatura científica (Titos et al. 2017, 2014; Casquero-Vera et al. 2021, 2019; Casquero Vera et al. 2016; del Águila et al. 2018) especially in rural areas, its impact in urban air quality of southern European countries has been sparsely investigated. In this study, highly time resolved multi-wavelength absorption coefficients together with levoglucosan (BB tracer. Los patrones de variación diaria, semanal y estacional arrojan luz sobre los distintos factores que afectan a la concentración de material particulado, y permiten lanzar hipótesis sobre las fuentes de las emisiones, que han de corroborarse mediante análisis químico. Los datos recogidos en este proyecto muestran los mismos patrones temporales ya descritos en Granada, lo que sirve de validación y confirma el potencial de los sensores de bajo coste para extender el alcance de los sensores certificados.

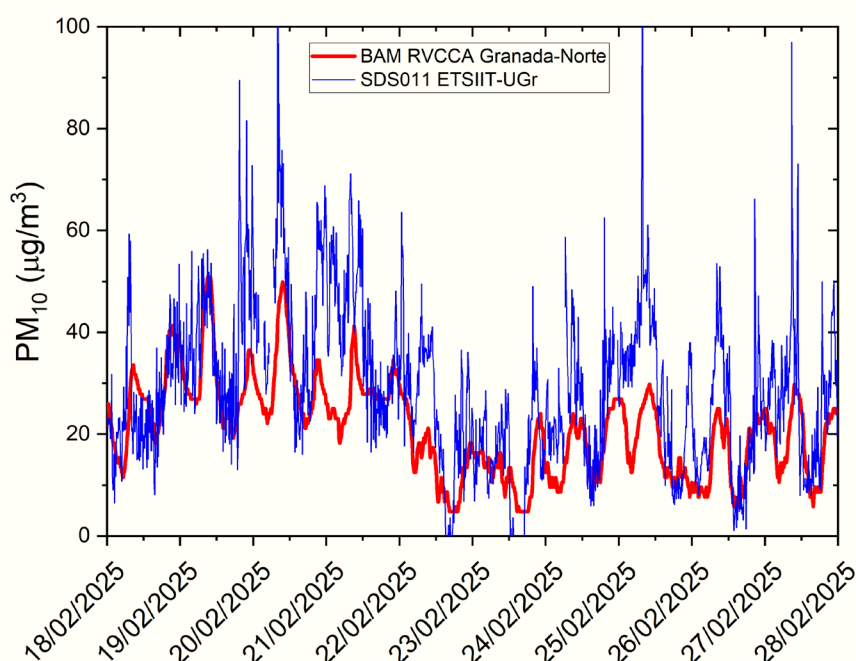


Figura 37. Comparación de datos diezminutales medidos en la estación de Granada-Norte (línea roja) con datos obtenidos en las proximidades de esta por el sensor de este proyecto situado en la ETSIIT (línea azul).

5.2. Diferencias con las medidas de referencia

Los datos diarios y horarios de los equipos BAM de la RVCCA que pueden descargarse del portal de datos de la Junta de Andalucía (<https://www.juntadeandalucia.es/datosabiertos/portal/dataset/datos-cuantitativos-historicos-horarios-y-dia-rios-de-calidad-del-aire-en-andalucia>) presentan una variación suave comparados con las medidas de los SDS011 o con la del propio TEOM, por lo que es probable que se les aplique algún tipo de promediado interno o que se use un algoritmo de validación que filtra valores que se consideran erróneos. Los propios datos diezminutales con los que se obtienen esos promedios también presentan una variación mucho más suave (**Figura 37**) y son de muy baja resolución numérica, como puede verse en las calibraciones (**sección 4.1.2.2**)

La diferencia entre los valores absolutos medidos por los sensores y los medidos por las dos estaciones reflejan en gran medida la diferencia entre el TEOM del IISTA, al que están anclados los SDS011, y los BAM de la RVCCA (**Figura 22** y **Tabla 13**). Los BAM miden concentraciones de PM_{10} en torno a un 35 % más bajas que el TEOM, habiendo estado este generalmente en localizaciones urbanas de fondo comparables (**Tabla 7**). Tanto el TEOM como los BAM se corrigen con medidas con la técnica de referencia realizadas en la misma localización. Estas correcciones han sido inferiores al 10 % en 2023 y 2024 para PM_{10} , para los BAM como puede verse en la **Tabla 2** y son del mismo orden o inferiores para el TEOM. Es por ello por lo que la diferencia del 35 % no puede atribuirse a desviaciones de los sensores con respecto a la medida de referencia. Esta desviación podría atribuirse a la propia localización, a la forma de muestrear el aire, o al procesamiento de los datos.

Las concentraciones de PM_{10} medidas con los BAM son un 55 % más bajas que las medidas por el SDS011 situado en la ETSIIT (cerca de la estación Granada-Norte). La diferencia de los BAM con los SDS011 es mayor que la incertidumbre que hemos estimado para los promedios diarios de valores calibrados y con corrección de crecimiento higroscópico. La incertidumbre de las medidas de los BAM no se reporta, pero debería estar en torno a un 10 % del valor medido. Desconocemos el origen de estas discrepancias, que ponen de relieve la necesidad de realizar intercomparaciones con otros instrumentos, expandir la red con estaciones adicionales y ofrecer una mayor transparencia en la adquisición, gestión y control de calidad de los datos.

5.3. Comparación con los umbrales legales y las recomendaciones sanitarias

Como se ha dicho anteriormente, los datos analizados en este informe tienen un carácter informativo y carecen de validez desde un punto de vista legal. Sin embargo, pueden considerarse como un complemento de las medidas con instrumentos de referencia y equivalentes cuyas mediciones si son legalmente vinculantes. Según los datos recogidos en este proyecto los niveles de PM_{10} y $PM_{2.5}$ podrían estar más cercanos a los límites marcados en la legislación actual que lo que indican los datos de la RVCCA, y por encima de los nuevos límites establecidos en la Directiva UE 2024/2881 (ver [Tabla 12](#) y [Tabla 14](#)), cuya entrada en vigor tendrá lugar en 2030. Este resultado podría sugerir que es necesaria un rediseño de la red. Ya existían indicios previos obtenidos con la unidad móvil del IISTA-UGr de que la estación de Granada-Norte registra valores demasiado bajos de diversos contaminantes.

5.4. Interpretación de los patrones espaciales

Es importante destacar, en primer lugar, que las medidas móviles representan una imagen incompleta y parcial de la contaminación en Granada, dado que el muestreo realizado es escaso e irregular y los datos se obtienen con un tiempo de promediado muy corto. A pesar de ello, las medidas con los sensores portátiles nos han proporcionado importante información y pueden guiar futuras investigaciones o incluso la instalación de una red de sensores que suplemente las medidas oficiales.

Las medidas georeferenciadas normalizadas indican, por un lado, que las estaciones de la RVCCA son representativas de una gran parte de la ciudad, incluyendo las zonas en las que se han tomado medidas fijas de larga duración en este proyecto. Sin embargo, los mapas también revelan la existencia de zonas extensas con elevadas concentraciones de material particulado, fundamentalmente relacionadas con el tráfico, con valores instantáneos que pueden llegar a ser hasta 5 veces más altos que en los puntos de referencia. Estas zonas incluyen como era de esperar el gran eje de circulación que va desde Recogidas hasta Avenida de Madrid o algunos accesos a la ciudad desde la circunvalación, pero también otras zonas como el entorno de la avenida de Dílar o de la Carretera de Málaga. Existe la posibilidad de que en estas zonas se superen incluso los umbrales legales actuales, y por ello no deberían ser ignoradas en las políticas de movilidad y calidad del aire municipales.

5.5. Conclusión y resumen

La legislación establece una metodología de medición de referencia (método gravimétrico) y faculta a los titulares de las redes de monitorización oficiales (en este caso la Junta de Andalucía) a emplear métodos equivalentes certificados de medida en tiempo real (por ejemplo BAM o TEOM). Los sensores de partículas de bajo coste no pueden sustituir a los instrumentos certificados, aunque la legislación europea ya contempla su uso bajo la categoría específica de mediciones indicativas. Estas deben cumplir unas especificaciones técnicas que se detallan en la norma CEN/TS 17660-2:2024. En este nuevo marco normativo, el sensor SDS011 no dispone de una certificación de cumplimiento. No obstante, en este proyecto hemos abordado los tres puntos clave de la norma de mediciones indicativas: (i) calibración mediante ensayos de campo comparando el sensor directamente con un método equivalente (TEOM respaldado por un sistema gravimétrico del alto volumen), (ii) corrección de las interferencias ambientales (principalmente el crecimiento higroscópico), quedando la incertidumbre diaria expandida por debajo del 50 %, y (iii) establecimiento de un protocolo de recalibración periódica. Este rigor metodológico asegura que el sensor mantenga una correlación constante con los equipos oficiales, permitiendo que sus datos puedan ser integrados de forma coherente en los inventarios de calidad del aire dentro del período de caracterización de estos (la duración del proyecto). Por ello, con esta validación post-hoc, los sensores usados durante este proyecto pueden considerarse a efectos demostrativos como medidores indicativos en el sentido de la Directiva UE 2024/2881. Jurídicamente, los datos no son vinculantes, pero tienen solidez técnica y pueden ser presentados como evidencia de la calidad del aire en Granada. Es claro que puede implementarse una red mejorada con sensores de gama alta (2000€-6000€) que sí están en posesión de certificaciones técnicas (control preciso de caudal, trazabilidad del dato, etc) y por tanto son de partida medidas indicativas según la Directiva (UE) 2024/2881.

El valor que aporta una red o un sistema móvil de sensores de bajo coste como los que se proponen en este proyecto es la extensión de la cobertura de un sistema de medidor equivalente-medidor de referencia (un TEOM o un BAM con su correspondiente medidor gravimétrico de alto volumen) a amplias zonas geográficas, proporcionando incluso una cobertura completa aproximada utilizando un sistema de información geográfica. Esta posibilidad ya se plantea en la Directiva (UE) 2024/2881 para zonas que no superan los umbrales de contaminación. La ventaja de la red de medidas indicativas ancladas a un medidor equivalente es que puede proporcionar una visión más detallada de los complejos patrones de emisión que se dan en zonas

urbanas, sin abandonar el rigor que supone tener en el corazón de la red uno o varios instrumentos certificados. Al mismo tiempo, permite determinar si la localización de las estaciones oficiales es adecuada, y si son suficientes (el Decreto 102/2011 establece un número mínimo según el tamaño de la población).

En lo que respecta a Granada, este trabajo ha obtenido las siguientes conclusiones:

1. Una red de sensores de bajo coste puede usarse para monitorizar la calidad del aire, como ya se ha intentado anteriormente, aunque no debe usarse de forma independiente, sino para ampliar el alcance espacio-temporal de uno o varios instrumentos certificados, siendo imprescindible la realización de calibraciones periódicas para asegurar la fiabilidad y consistencia de las medidas.
2. Parecen existir inconsistencias en las medidas de las dos estaciones de la RVCCA, con indicación de que los medidores BAM de ambas infraestiman, en comparación con el TEOM, las concentraciones de partículas. Es posible que la localización de las estaciones no sea la más adecuada (o que las estaciones sean insuficientes), y hay indicaciones de que el procesamiento de los datos es mejorable.
3. Las medidas indican que calidad del aire en lo referente a partículas está por debajo de los umbrales establecidos por la legislación actual tanto en escala diaria como anual, pero existe el riesgo de que se estén superando los nuevos umbrales previstos por la transposición de la normativa europea en 2030 y las recomendaciones de la OMS.
4. Granada presenta un patrón espacial complejo, con zonas bien representadas por la monitorización de la RVCCA, y otras expuestas a tráfico intenso en las que hay indicaciones de que se podrían incluso superar los umbrales de la legislación actual.

5.6. Propuestas

5.6.1. Mejora de la monitorización y la comunicación de la calidad del aire

Las estaciones de la RVCCA de la Junta de Andalucía podrían ser suplementadas con una red de sensores certificados para medidas indicativas según la Directiva (UE) 2024/2881, aunque esta medida debería ir acompañada de una revisión independiente del diseño de la red mediante campañas de intercomparación con medidas equivalentes, medición indicativa y modelización. La legislación europea permite reducir hasta en un 50 % el número de puntos de muestreo fijos si se suplementan con medidas indicativas, pero esta posibilidad queda condicionada a que no se superen los umbrales de evaluación superiores en la zona. Sin embargo, si una red de vigilancia está mal diseñada (por ejemplo, situando las estaciones de medida en parques aislados o zonas de limpieza estadística), los datos oficiales marcarán niveles artificialmente bajos. Esto podría generar como consecuencia perversa la justificación de recortes y la eliminación de una estación. Nuestra propuesta es reforzar la RVCCA en Granada con una red de medidores indicativos que permitan, en caso de que sea necesario, rediseñar el despliegue de las estaciones de la red. Esta ampliación debería extenderse más allá del municipio de Granada, considerando que se trata de un problema que afecta a toda el área metropolitana. La anunciada estación avanzada de monitorización ambiental («*super-site*» contemplado en la Directiva UE 2024/2881) que se instalará en el IIISTA en 2026 y formará parte de la RVCCA, podría amplificar significativamente su alcance con una red de sensores subsidiarios desplegados por la capital y los municipios de la Vega. La disponibilidad de una red de sensores de medición indicativa produciría además un conjunto de datos para informar con mejor resolución espacial al sistema 5G CityBrain, herramienta de gestión inteligente de la ZBE de Granada.

En lo referente a transparencia, la RVCCA de la Junta de Andalucía garantiza el acceso público a las mediciones horarias en tiempo real a través de sus plataformas digitales cumpliendo con los estándares de difusión de datos brutos establecidos en la normativa vigente. No obstante, el sistema presenta carencias en la trazabilidad de sus procesos técnicos por dos deficiencias diferenciadas. En primer lugar, la aplicación de los factores de corrección sobre los métodos equivalentes se realiza de forma retroactiva, lo que impide conocer la validez legal del dato en tiempo real y genera una incertidumbre que sólo se despeja a año vencido. En segundo lu-

gar, los criterios para la edición y el descarte de registros —el proceso de eliminar valores bajo el pretexto de errores técnicos o anomalías instrumentales— no son consultables de forma pormenorizada por los administrados, lo que imposibilita una auditoría externa que verifique si dichas anulaciones responden a fallos reales o a una gestión discrecional de los episodios de contaminación. Así mismo, los datos parecen presentar redondeo, suavizado y sustitución de mínimos. Para un análisis independiente, se requiere acceso público a los datos diezminutales brutos, con al menos un decimal de precisión y sin filtros de suavizado, sin que sea necesaria una petición formal de transparencia.

En cuanto a la monitorización que se realiza desde el Ayuntamiento, sería deseable que el portal de calidad del aire en la web municipal fuera rediseñado y reestructurado, mostrando los datos de la RVCCA en tiempo real mediante gráficos de mejor calidad y enlazando con el portal de movilidad, de forma que se visualice la relación causa-efecto. Además de mejorar el acceso a las series históricas oficiales, el repositorio de datos debería incluir proyectos abandonados como CitySens y Airly. Si estos datos no son válidos, al menos deberían existir informes de valoración de las iniciativas. La web debería proporcionar información actualizada sobre el estado del proyecto 5G CityBrain y la posible implantación del sistema de control de tráfico adaptativo para reducir congestión y emisiones por ralentí. Un ejercicio de transparencia adicional consistiría en poner a disposición del público los datos del sensor de Méndez Núñez, con el objetivo de concienciar sobre las discrepancias entre las emisiones reales y el etiquetado de la DGT. Por otro lado, el IISTA trabaja en la elaboración de una metodología para detectar señales de alerta que minimicen las exposiciones cuando se dan situaciones meteorológicas adversas de estancamiento, que en un futuro podría integrarse en el portal de calidad del aire municipal.

Por último, el Ayuntamiento de Granada y a la Junta de Andalucía deberían realizar un esfuerzo divulgativo para dar a conocer el problema de salud pública que supone la calidad del aire (sin olvidar también el problema de la contaminación acústica). En este sentido, este trabajo muestra que los proyectos de voluntariado y ciencia ciudadana son herramientas muy útiles que además de concienciar y educar permiten a los ciudadanos aportar a la gestión y monitorización del espacio público y el medio ambiente, y contribuir al conocimiento científico. Un programa de sensores ciudadanos instalados en viviendas o centros educativos, realizado en colaboración con la Universidad de Granada, podría contribuir al conocimiento del problema y a la adopción de posiciones bien fundamentadas sobre las medidas de reducción de emisiones.

5.6.2. Propuestas relativas a la reducción de emisiones

Las circunstancias orográficas y meteorológicas de la Vega de Granada que describe el informe del IISTA de 2016 para el ayuntamiento de la capital (Casquero Vera et al. 2016) hacen que las emisiones de contaminantes atmosféricos en el área metropolitana afecten a todos los municipios situados dentro de este ámbito geográfico. Por ello, la mejora de la calidad del aire no puede solucionarse únicamente con medidas en el municipio de Granada, sino que requiere una respuesta coordinada de todos los municipios que trate de afrontar problemas estructurales. Esto requiere de una mirada a largo plazo, de un consenso político que desgraciadamente parece inalcanzable en la actualidad y de grandes inversiones públicas.

5.6.2.1. Movilidad

Las estrategias que están adoptando las ciudades comprometidas con la mejora de la habitabilidad suelen ser integrales, combinando medidas de restricción con incentivos. Los desincentivos al vehículo privado como peajes urbanos (Londres, Singapur, Nueva York), zonas de bajas emisiones (París, Londres) y reducción de aparcamientos (Oslo) se combinan con inversiones en alternativas, priorizando la movilidad activa (peatones y bicicletas en Copenhague y París) y reforzando el transporte público (Singapur, Nueva York). A esto se suma el rediseño del espacio público: convertir calles antes destinadas al coche en espacios peatonales o de movilidad suave (Viena).

El «Modelo Pontevedra» es una estrategia de movilidad urbana referente a nivel mundial basada en una transformación radical del espacio público que prioriza al peatón mediante la inversión de la jerarquía de transporte, eliminando casi por completo el tráfico de paso en el centro urbano. Este modelo de ciudad compacta limita la velocidad y sustituye los aparcamientos en superficie por zonas de servicios de quince minutos, desplazando el estacionamiento de larga duración a parkings gratuitos en la periferia. Gracias a herramientas visuales como el mapa Metrominuto y una infraestructura de plataforma única sin aceras, la ciudad ha logrado reducir drásticamente las emisiones contaminantes y alcanzar una seguridad vial total con cero fallecidos, convirtiéndose en un referente internacional de sostenibilidad y convivencia social. El alcalde de Pontevedra, Miguel Anxo Fernández Lores, preside la plataforma «Ciudades que Caminan» a nivel estatal en España. Esta red agrupa a municipios comprometidos con la promoción de la movilidad peatonal y la recuperación del espacio público. El requisito fundamental es asumir los principios recogidos en la Carta de los Derechos del Peatón (Parlamento Europeo, 1988) y la Carta Internacional del Caminar (Walk 21, 2006). Esto implica un compromiso con la movilidad de base

peatonal, el derecho al espacio público, la seguridad vial con enfoque peatonal, la ciudad inclusiva y la autonomía infantil y un medio ambiente urbano saludable. 93 municipios y 4 diputaciones provinciales están adheridos a esta red, incluyendo 10 capitales de provincia. Entre estas se encuentran otras ciudades con propuestas de movilidad sostenible y reducción de emisiones destacadas como Valladolid, Vitoria/Gasteiz, San Sebastián/Donostia y las Palmas de Gran Canaria.

A pesar de los importantes esfuerzos que se están haciendo desde la administración municipal y regional para mejorar el transporte público y la red vial en el municipio de Granada, la ciudad sigue teniendo una gran dificultad para invertir la jerarquía de transporte debido a los problemas estructurales que se han mencionado anteriormente. Uno de los grandes déficits de la ciudad es la falta de impulso a la movilidad activa, con una infraestructura para bicicletas y vehículos de movilidad personal (VMP) muy deficiente y falta de incentivos para el uso de estos. Sería deseable profundizar en la recuperación de espacios para uso ciudadano más allá del ensanchamiento de aceras, con un modelo de ciudad compacta y de proximidad ampliando zonas peatonales en la zona centro siguiendo el modelo de la Calle San Antón y eliminando aparcamientos para no residentes.

Una de las alternativas propuestas a la actual ZBE es reducir su extensión al casco histórico de la ciudad. Los patrones espaciales obtenidos en este proyecto indican una zona de contaminación persistente en la almendra central. No obstante, existen otras zonas de Granada en las que las concentraciones son también más elevadas que en los puntos de referencia, como el entorno de la carretera de Málaga en la Chana, La Avenida de Dílar en el Zaidín y diversos puntos de acceso desde la circunvalación. Por ello, una futura reforma de la ZBE no debería en ningún caso reducir el área de aplicación de esta, sino prestar atención especial al centro histórico y otras zonas con control dinámico del tráfico, restricciones adicionales, peatonalizaciones y refuerzo del transporte público eléctrico, estableciendo una Zona de Emisiones Ultrabajas (ZEUB).

La actual ordenanza de ZBE hace un diagnóstico atinado pero se muestra incapaz de ligar el intenso tráfico rodado causante de la contaminación con los problemas socioeconómicos sistémicos de la zona metropolitana. El proyecto se hace sin contar con los municipios del cinturón, por lo que parece más encaminado al cumplimiento formal de la normativa nacional y europea para evitar multas de la Unión Europea que a una verdadera voluntad de acabar con los problemas de movilidad y contaminación.

Existen varias propuestas para mejorar la eficacia de la ZBE sin perjudicar a los ciudadanos del área metropolitana:

1. Fortalecimiento de los parkings de borde y disuasorios. El modelo actual ya contempla parkings en los límites de la ZBE. La mejora pasaría por la creación de aparcamientos gratuitos o bonificados, vincular el uso de estos con el transporte público (permitiendo que quien aparque fuera del centro tenga el billete de bus o metro incluido o muy rebajado) y ubicarlos estratégicamente, ampliando la capacidad en puntos clave de entrada como el PTS.
2. Transporte público metropolitano de alta frecuencia. La dependencia del coche en el área metropolitana es alta debido a la falta de alternativas competitivas. Las soluciones propuestas incluyen la ampliación del metro y las líneas de autobús interurbano, lo que ya se prevé en el Plan de Transporte Metropolitano del Área de Granada. Debe garantizarse el mantenimiento de las ayudas al transporte público para que el coste no sea una barrera para las rentas bajas.
3. Mejora de la infraestructura ciclista. Conectar los carriles bici de los municipios vecinos con la capital para que el desplazamiento en VMP sea una opción segura y real para los trabajadores del cinturón.
4. Modelo de excepciones más afinado por renta y trabajo. En lugar de crear nuevas excepciones genéricas, se sugiere realizar un control digital estricto que cruce datos en tiempo real. Esto implica conectar las cámaras de la ZBE con los registros de la Agencia Tributaria para exenciones por renta automática y con los tickets de los parkings para multar el tráfico de paso, permitiendo el acceso solo a quien realmente lo necesita por trabajo o vulnerabilidad económica y eliminando el uso de la ciudad como atajo. También se pueden implementar zonas de carga y descarga inteligentes (como en Madrid o Barcelona) donde el transportista debe reservar plaza por una app. Si el vehículo sin etiqueta entra pero no reserva plaza de carga, se entiende que no está trabajando y se le sanciona.
5. Coordinación metropolitana unificada. Actualmente, las críticas señalan que Granada capital crea normas sin consenso con el cinturón. Diversos grupos políticos y sociales proponen una ZBE más justa y ambiciosa pactada con todos los municipios del área metropolitana para que las reglas sean coherentes y no discriminen a las personas que no viven en la capital.

Otra crítica importante a la ZBE es el uso del sistema de etiquetas de la DGT para restringir la circulación. Este sistema se basa en el año de fabricación y la tecnología del motor, pero no mide las emisiones reales ni el uso del vehículo. Esto genera dos grandes injusticias: un coche antiguo que circula 1.000 km al año contamina mucho menos que un SUV híbrido «ECO» que hace 30.000 km, y un vehículo viejo perfectamente mantenido puede estar en mejor estado que uno más moderno descuidado. Además, el sistema favorece a las rentas altas que pueden comprar coches nuevos, convirtiendo el derecho a la movilidad en una cuestión de capacidad económica en lugar de necesidad ambiental. Existen alternativas al uso de este sistema, como un etiquetado dinámico según emisiones reales medidas en la ITV, una fiscalidad por uso y kilometraje, o el uso de criterios de peso y potencia. No obstante, hay un plan de reforma del sistema de etiquetas de la DGT previsto para 2026–2027, impulsado por la nueva Ley de Movilidad Sostenible. Esta actualización busca corregir estas injusticias, pasando de un sistema basado en el año de fabricación a uno basado en las emisiones reales. Elementos importantes de la propuesta son el endurecimiento de la etiqueta «CERO», la revisión de la etiqueta «ECO» y la inclusión de las emisiones de CO₂ como factor determinante. Es importante destacar que los cambios no afectarían a los coches ya matriculados.

5.6.2.2. Eficiencia energética y edificios

El consumo de energía en edificios residenciales, comerciales y públicos es otra fuente importante de emisiones. Los ayuntamientos en España tienen un margen de acción significativo que va más allá de la normativa estatal y autonómica, apoyándose en su autonomía para legislar a través de ordenanzas y gestionar el territorio. Tras la reforma de la Ley Reguladora de las Bases del Régimen Local (LRBRL) en marzo de 2026, los municipios cuentan con competencias propias explícitas para impulsar la eficiencia energética y el autoconsumo. Los ayuntamientos pueden utilizar las ordenanzas fiscales para incentivar el ahorro energético de forma directa a través de bonificaciones en el Impuesto de Bienes Inmuebles (IBI) por la instalación de sistemas de autoconsumo o rehabilitaciones que mejoren la calificación energética del edificio, reducciones del Impuesto sobre Construcciones, Instalaciones y Obras (ICIO) para actuaciones que incorporen energías renovables o medidas de eficiencia térmica, o bonificaciones en el Impuesto de Actividades Económicas (IAE) para comercios y empresas que implementen planes de transporte sostenible o mejoras drásticas en su consumo energético. De hecho, el Ayuntamiento de Granada tiene previstas este tipo de medidas, introduciendo beneficios para quienes apuesten por la energía limpia en el ejercicio de 2026, como una bonificación del 50 % en el IBI aplicable a viviendas que instalen sistemas de autoconsumo eléctrico o térmico

(aunque solamente durante el año siguiente a la instalación) y una bonificación del 95 % en el ICIO para obras que incorporen energías renovables y del 75 % para mejoras de eficiencia energética.

En Granada hay cuatro comunidades energéticas locales consolidadas y otras dos en fase de grupo motor. El Ayuntamiento de la capital ha cedido gratuitamente cubiertas de edificios públicos a algunas de estas iniciativas, si bien no aporta fondos para la adquisición de las placas, que son sufragadas en parte con fondos estatales (50–60%) y en parte por los vecinos. A pesar de que el Ayuntamiento afirma apoyar estos proyectos, los colectivos vecinales y expertos de la OSCE (Oficina Social de Comunidades Energéticas) critican la excesiva burocracia en la cesión de tejados públicos. No existe un catálogo públicamente accesible de qué cubiertas municipales están disponibles y en qué estado técnico se encuentran. Además, el Ayuntamiento pone trabas legales argumentando que la cesión de un tejado de un colegio o centro cívico requiere procesos de licitación, que pueden durar años, en lugar de usar convenios de colaboración público-social, que permiten adjudicar el uso del tejado directamente a la comunidad energética del barrio si hay un fin social. Otro punto de fricción ha venido siendo la instalación de placas solares en zonas históricas, que afecta principalmente al Albaicín y al Realejo. La Comunidad Energética «Barrios de la Alhambra» no tiene placas instaladas a día de hoy. A pesar de que la OSCE y la cooperativa han identificado varios edificios en los límites o fuera de la zona histórica como candidatos ideales, el Ayuntamiento no ha firmado la cesión de ninguno. La única cubierta que está en tramitación actualmente es la del parque sur de bomberos. La comunidad tiene una subvención concedida para hacer la instalación y está en riesgo de perderla porque para recibir el dinero necesitan presentar el permiso de uso del tejado, pero el Ayuntamiento sigue sin responder.

El Ayuntamiento de Granada también dice estar integrando la eficiencia en la gestión de sus propios recursos y el urbanismo. A través de programas como Granada Metrópoli, se están ejecutando obras en edificios públicos para reducir su consumo eléctrico en un 20 % mediante mejores envolventes y luminarias LED. Con respecto a eficiencia en edificios históricos, Granada es una de las ciudades piloto en una iniciativa europea (SMARTeeSTORY) para desarrollar sistemas de control y automatización energética en edificios históricos de titularidad pública. Se trata de un reto importante para la ciudad, ya que se trata de modernizar edificios dentro de un gran casco histórico con elevada protección. Sin embargo, de momento solo se trata de una iniciativa investigación y validación, no un plan de despliegue masivo.

5.6.2.3. *Industria y actividad comercial*

Según (Titos et al. 2014), las fuentes identificadas en la fracción de materia particulada gruesa son polvo mineral, recirculación regional, material regional mezclado y procesado, polvo de carretera y polvo de las minas de celestina de Montevive. En la fracción fina se identificaron polvo mineral, recirculación regional, emisiones de tráfico y polvo de carretera. (Titos et al. 2017) y (Casquero-Vera et al. 2021) cuantificaron la presencia de aerosoles generados por quema de biomasa en la Vega, si bien no ha sido posible distinguir entre quema de residuos del sector primario y chimenea doméstica. En cualquier caso, las principales fuentes relacionadas con actividad económica no comercial se sitúan en el sector primario y en el área metropolitana. Los núcleos industriales también se sitúan en el área metropolitana, aunque la densidad industrial es baja, lo que queda reflejado en las bajas concentraciones de SO_2 medidas por la red de calidad del aire. Estos datos ponen de manifiesto una vez más la necesidad de que las estrategias de mejora de calidad del aire se coordinen con todos los municipios del área metropolitana, como por ejemplo la implantación de un gran sistema de compostaje en la Vega que remplace a las quemas de rastrojos.

En la capital el suelo industrial es escaso y la actividad económica está dominada por el sector servicios, la administración y la universidad. La principal industria de la capital granadina es el turismo, que influye de manera significativa en la calidad del aire, principalmente a través del tráfico rodado y la concentración de visitantes en el núcleo histórico. Es importante destacar que en la Alhambra se han medido niveles de partículas de carbón negro (*black carbon*, BC) elevados que pueden suponer un riesgo desde el punto de vista de la conservación a largo plazo, y que la principal fuente de esta contaminación atmosférica son las emisiones de tráfico rodado del área urbana adyacente y de los accesos por carretera al monumento (Patrón et al. 2017). Por otro lado, la turistificación provoca una alta densidad de servicios y tráfico en el centro de la capital. Las mediciones realizadas en este proyecto indican precisamente que el centro histórico muestra una alta densidad de emisiones. Además de medidas estructurales de más calado como la limitación de pisos turísticos en zonas saturadas, se han propuesto diversas medidas para mitigar el impacto turístico en la ciudad, entre ellas una tasa verde turística cuya recaudación se invertiría en reforestación urbana y transporte eléctrico. También se ha propuesto la reducción de coches de alquiler en el centro, el refuerzo de las líneas de autobús, un sistema integrado de movilidad turística mediante billete único, un sistema de alquiler de bicicletas eléctricas o VMP. Hay que recordar aquí que los sistemas de alquiler de bicicletas y VMP en Granada han sufrido una sucesión de fracasos debido principal-

mente a una combinación de vandalismo extremo, falta de rentabilidad y cambios regulatorios constantes.

5.6.2.4. Espacios verdes y captura de contaminantes

Existe evidencia científica sólida de que los árboles mejoran la calidad del aire urbano a través de dos mecanismos principales: la captura de partículas depositadas en la superficie de las hojas y absorción de contaminantes gaseosos (NO_x , O_3 , SO_2) a través de los estomas de las hojas. El reverso de este servicio ecosistémico de regulación que ejercen los árboles es que los contaminantes también actúan como estresores fitotóxicos que dañan su salud, debido a la obstrucción de estomas por partículas finas, el daño celular por exposición a NO_x y O_3 , la acidificación del suelo por la deposición de NO_2 y la vulnerabilidad secundaria (un árbol debilitado por la contaminación es propenso a sufrir plagas o a no resistir periodos de sequía). Es importante destacar que el servicio de regulación depende de la configuración urbana y la distancia a la fuente. Por ejemplo, aunque el Parque García Lorca es un pulmón verde importante, su ubicación junto a la autovía GR-30 lo expone a una carga de contaminantes que la vegetación actual no puede compensar. La unidad móvil del IISTA ha realizado medidas en esta localización que reflejan niveles de contaminación puntuales significativamente más elevados que los medidos por la estación de Granada Norte. Esto podría ocurrir por la proximidad al principal foco de emisión de NO_x y partículas en Granada. Al estar el parque junto a la autovía, la concentración es máxima antes de que el aire pueda dispersarse o ser filtrado por la masa arbórea. Las masas arbóreas, además, tienen una capacidad de filtrado limitada. Por otro lado el parque actúa como barrera en esa zona del distrito Ronda, en el que las concentraciones de partículas y NO_x serían más altas de no existir la zona verde. Por otro lado, hay situaciones en las que los árboles pueden impedir que el aire se renueve, dejando la contaminación atrapada donde camina la gente, si se plantan de forma muy cerrada en una calle con mucho tráfico.

En el presente estudio no se han observado concentraciones de partículas especialmente altas en el perímetro del Parque García Lorca, ni en el carril bici paralelo a la autovía ni en la calle Arabial, aunque por ejemplo si se detectaron en los mismos recorridos de muestreo concentraciones elevadas en la rotonda de Méndez Núñez. También se han detectado concentraciones elevadas en la zona centro, especialmente en el eje Recogidas – Reyes Católicos – Gran Vía/Elvira – Avenida de Madrid, en el que existe una densidad de árboles irregular. Las medidas móviles son próximas a las fuentes y reflejan la densidad de emisiones más que la calidad del aire de fondo (si bien es posible que la calidad del aire sea peor en estas zonas), de forma

que no son adecuadas para estudiar el efecto de los árboles en la contaminación. Para ello se requiere un diseño con numerosos sensores fijos en el área de estudio, que puede proponerse como un proyecto de ciencia ciudadana como continuación del presente trabajo.

5.6.2.5. Educación ambiental y participación ciudadana

Parte de la resistencia de la sociedad a las medidas de mejora de calidad del aire, a parte de problemas de diseño de las medidas que ya se han expuesto anteriormente, está relacionada con la falta de concienciación con los problemas de salud pública que implica y con desconocimiento de alternativas para mejorar la habitabilidad de las ciudades que no suponen ni interrupciones ni perjuicio económico. El Ayuntamiento de Granada y la Junta de Andalucía tienen un amplio margen para mejorar la información pública sobre este problema y para involucrar a los ciudadanos en la búsqueda de soluciones. Se trata de ir más allá de la celebración de eventos institucionales como la Semana de la Movilidad, o del cierre experimental al tráfico de la Calle Reyes Católicos los domingos. Este tipo de actividades deben ir acompañadas de actividades encaminadas a la concienciación de la sociedad granadina sobre salud pública y movilidad activa, movilidad y consumo de energía libres de emisiones, organización del espacio público, efectos del cambio climático en la ciudad, transparencia en la gestión de los datos de calidad del aire, etc. A continuación se enumeran algunas acciones:

1. Campañas de concienciación local, con mensajes en autobuses, redes, calles para el uso de transporte limpio, reducción del uso de calefacciones contaminantes, ahorro energético, importancia para la salud de la calidad del aire y sobre la ocupación del espacio público y la habitabilidad de las ciudades. Aconsejando sobre el cambio de hábitos para reducir emisiones, dieta mediterránea, andar, comprar productos locales de cercanía en el barrio, etc.
2. Programas educativos en colegios e institutos con talleres sobre contaminación, energía y movilidad sostenible, medición de calidad del aire en el entorno escolar, proponiendo retos y soluciones para reducir el consumo energético.
3. Campañas de movilidad sostenible «Granada se mueve sin humo» con días sin coche en zonas céntricas, como se hace en algunas ocasiones, ofreciendo rutas guiadas, préstamo de bicicletas, etc.

4. Talleres de consumo responsable, por ejemplo en centros cívicos y barrios sobre reducción de residuos, reparación de objetos, reciclaje correcto.
5. Voluntariado ambiental urbano con jornadas de plantación de árboles, mantenimiento de zonas verdes o huertos urbanos.
6. Foros ciudadanos del clima con reuniones periódicas entre vecinos, expertos de la UGr, ayuntamiento...
7. Presupuestos participativos verdes con reserva de dinero por parte del ayuntamiento para proyectos sostenibles con la participación ciudadana para propuestas y votar ideas.
8. Transparencia en datos de calidad del aire . Aplicaciones y paneles informativos que muestren en tiempo real los niveles de contaminación , transporte, consumo , energía y recomendaciones para la población.
9. Formación a comercios y empresas con cursos gratuitos para ahorro energético, reducción de residuos y el uso de energías renovables, encaminados a un comercio sostenible en Granada.
10. Programas de ciencia ciudadana . Sensores ciudadanos de calidad del aire que ayuden a mapear emisiones y comportamientos contaminantes.



Anexos

Anexo I. Metodología de Cálculo del Índice de Calidad del Aire (ICA)

El cálculo del Índice de Calidad del Aire en el territorio español no es una estimación subjetiva, sino que sigue un protocolo técnico estandarizado por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO, 2020), en estricta coherencia con el Real Decreto 102/2011 y la Orden TEC/351/2019. El proceso se detalla a continuación:

Tratamiento Temporal de Datos

Para que el índice refleje el impacto real en la salud, se aplican diferentes metodologías de promediado según la naturaleza del contaminante (Orden TEC/351/2019, Anexo I, modificada por la Resolución de 2 de septiembre de 2020, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental):

- **Partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$:** Se utiliza la media móvil de las últimas 24 horas. Este método permite suavizar picos horarios irrelevantes y ofrecer una visión de la exposición diaria acumulada, que es la que determina el riesgo respiratorio y cardiovascular (RD 102/2011, Anexo VI). es importante destacar que para el calculo del ICA no se excluyen los episodios de intrusión de polvo sahariano, dado que es un indicador de salud publica inmediata.
- **Ozono:** Se utiliza la media móvil de las concentraciones de las últimas 8 h.
- **NO_2 y SO_2 :** Se emplean medias horarias capturadas por los sensores de las estaciones de vigilancia (RD 102/2011, Anexo III).

Puntos de Corte y Categorización

El sistema español emplea una escala de seis categorías. Para que tu informe sea preciso, los valores medidos en Granada deben contrastarse con los siguientes intervalos de concentración expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Metodología del Índice Nacional de Calidad del Aire, 2020):

CATEGORÍA	PM ₁₀ (24 h)	PM _{2.5} (24 h)	NO ₂ (1 h)
Buena	0 – 20	0 – 10	0 – 40
Razonablemente Buena	21 – 35	11 – 20	41 – 90
Regular	36 – 50	21 – 25	91 – 120
Desfavorable	51 – 100	26 – 50	121 – 230
Muy Desfavorable	101 – 150	51 – 75	231 – 340
Extremadamente Desfavorable	151 – 1200	76 – 800	341 – 1000

Criterio de Integración (Peor Valor)

El ICA global de una zona se rige por el principio de «peor condición». Según la normativa (Orden TEC/351/2019), el índice global será el correspondiente a la categoría más desfavorable de cualquiera de los contaminantes medidos. Este criterio asegura que no se enmascara un riesgo específico; por ejemplo, en Granada se han detectado niveles bajos de NO₂ coincidentes con niveles altos de partículas finas por quemas de biomasa o inversión térmica. En tal caso, el ICA refleja el riesgo de las partículas (RD 102/2011, Anexo XI).



Referencias bibliográficas

- Águila, A. del, M. Sorribas, H. Lyamani, et al. 2018. «Sources and Physicochemical Characteristics of Submicron Aerosols during Three Intensive Campaigns in Granada (Spain).» *Atmospheric Research* 213 (November): 398–410. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.004>.
- Badura, Marek, Piotr Batog, Anetta Drzeniecka-Osiadacz, and Piotr Modzel. 2018. «Evaluation of Low-Cost Sensors for Ambient PM_{2.5} Monitoring.» *Journal of Sensors* 2018 (1): 5096540. <https://doi.org/10.1155/2018/5096540>.
- Budde, Matthias, Schwarz, Almuth D., Müller, Thomas, et al. 2018. «Potential and Limitations of the Low-Cost SDS011 Particle Sensor for Monitoring Urban Air Quality.» Paper presented at 3rd International Conference on Atmospheric Dust – DUST2018. *ProScience*, December 14. <https://www.scientevents.com/proscience/download/potential-and-limitations-of-the-low-cost-sds011-particle-sensor-for-monitoring-urban-air-quality/>.
- Bulot, Florentin M. J., Steven J. Johnston, Philip J. Basford, et al. 2019. «Long-Term Field Comparison of Multiple Low-Cost Particulate Matter Sensors in an Outdoor Urban Environment.» *Scientific Reports* 9 (1): 7497. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43716-3>.
- Casquero Vera, Juan Manuel, Gloria Titos Vela, and Lucas Alados Arboledas. 2016. «Diagnóstico de La Calidad Del Aire Del Área Metropolitana de Granada.» Informe técnico para el ayuntamiento de Granada. Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía – Universidad de Granada. [https://www.granada.org/inet/agenda21.nsf/cff91acc5fede7f9c125727500305ef9/0aae130c836640acc1257f88002dc457/\\$FILE/Diagnostico%20Calidad%20Aire.pdf](https://www.granada.org/inet/agenda21.nsf/cff91acc5fede7f9c125727500305ef9/0aae130c836640acc1257f88002dc457/$FILE/Diagnostico%20Calidad%20Aire.pdf).
- Casquero-Vera, J. A., H. Lyamani, G. Titos, et al. 2021. «Quantifying Traffic, Biomass Burning and Secondary Source Contributions to Atmospheric Particle Number Concentrations at Urban and Suburban Sites.» *Science of The Total Environment* 768 (May): 145282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145282>.
- Casquero-Vera, J. A., H. Lyamani, G. Titos, E. Borrás, F. J. Olmo, and L. Alados-Arboledas. 2019. «Impact of Primary NO₂ Emissions at Different Urban Sites Exceeding the European NO₂ Standard Limit.» *Science of The Total Environment* 646 (January): 1117–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.360>.
- Crilley, Leigh R., Marvin Shaw, Ryan Pound, et al. 2018. «Evaluation of a Low-Cost Optical Particle Counter (Alphasense OPC-N2) for Ambient Air Monitoring.» *Atmospheric Measurement Techniques* 11 (2): 709–20. <https://doi.org/10.5194/amt-11-709-2018>.

- Hagan, David H., and Jesse H. Kroll. 2020. «Assessing the Accuracy of Low-Cost Optical Particle Sensors Using a Physics-Based Approach.» *Atmospheric Measurement Techniques* 13 (11): 6343–55. <https://doi.org/10.5194/amt-13-6343-2020>.
- Jiao, Wan, Gayle Hagler, Ronald Williams, et al. 2016. «Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) Project: Evaluation of Low-Cost Sensor Performance in a Suburban Environment in the Southeastern United States.» *Atmospheric Measurement Techniques* 9 (11): 5281–92. <https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016>.
- Laquai, Bernd. 2017. «(PDF) Impact of Particle Mass Distribution on the Measurement Accuracy of Low-Cost PM-Sensors.» https://www.researchgate.net/publication/320537200_Impact_of_Particle_Mass_Distribution_on_the_Measurement_Accuracy_of_Low-Cost_PM-Sensors.
- Patrón, D., H. Lyamani, G. Titos, et al. 2017. «Monumental Heritage Exposure to Urban Black Carbon Pollution.» *Atmospheric Environment* 170 (December): 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.030>.
- Titos, G., A. del Águila, A. Cazorla, et al. 2017. «Spatial and Temporal Variability of Carbonaceous Aerosols: Assessing the Impact of Biomass Burning in the Urban Environment.» *Science of The Total Environment* 578 (February): 613–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.007>.
- Titos, G., H. Lyamani, M. Pandolfi, A. Alastuey, and L. Alados-Arboledas. 2014. «Identification of Fine (PM₁) and Coarse (PM₁₀₋₁) Sources of Particulate Matter in an Urban Environment.» *Atmospheric Environment* 89 (June): 593–602. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.03.001>.
- WHO. 2021. *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>.

Agradecimientos

«Ciudades sostenibles – Ciudades Respirables» es un proyecto de la **ONG accionenred-Andalucía**. No habría sido posible sin la colaboración del equipo de voluntariado que ha participado en la recogida de datos, el seguimiento y la puesta en marcha del mismo:

Ala Zukri El Amrani, Ana Alameda Valenzuela, Ana García Monrío, Anabel Toro, Antonio Jesús Ocaña Fernández, Elliott James Aykroyd, Esther Rodríguez Bailén, Eva García Green, Federico Barragán Pimentel, Ginés Santiago Gras Alix, Giuseppe Lagomarsino, Isabel García Arias, Jesús Gámiz Ruiz, Lourdes Ortega Burgueño, Lucía Ramírez, Manuel Miñán Ruiz, Manuel Quintero Fuentes, María Aránega Cortés, María Bermúdez, Marina Serna Ostalaza, Maryin Navarro Rangel, Nuria Martínez López, Nuria Pistón Caballero, Pedro Ramón Torregrosa, Ramiro Andrei Villeda Prieto, Rubén Feuchter Castro, Sabina Moles Santiago, Veronica Marinari...

Este proyecto ha contado con el apoyo del Instituto de Astrofísica de Andalucía – Consejo Superior de Investigaciones Científicas y del Instituto Interuniversitario del Sistema Tierra de Andalucía – Universidad de Granada. Y recibió financiación de la Fundación Descubre en la convocatoria «Andalucía + Ciencia Ciudadana» de 2023.

Un proyecto de:



Participan:



Colaboran:





accionenred-andalucia.org

[@accionenred_andalucia](https://www.instagram.com/accionenred_andalucia)

justiciaclimaticagranada@accionenred-andalucia.org