



UNIVERSITAT_{DE}
BARCELONA

Análisis temporal del NO₂ en Sabadell y
evaluación del uso de sensores low-cost
como herramienta complementaria en la
monitorización de calidad del aire.

Autora: Luisa Fernanda Huertas Rojas

Tutora: Mireia Udina Sistach

Curs acadèmic: 2025 - 2026

Màster en Energies Renovables
i
Sostenibilitat Energètica

I. Índice

I.	Índice	2
II.	Listado de figuras	3
III.	Listado de tablas	4
IV.	Agradecimientos	5
V.	Resumen	6
VI.	Abstract.....	7
1	Introducción.....	8
1.1	Contexto general de la contaminación atmosférica urbana	8
1.2	El NO ₂ como contaminante de interés.....	8
1.3	Sensores low-cost y monitorización de la calidad del aire	9
2	Objetivos.....	10
2.1	Objetivo general	10
2.2	Objetivos específicos	10
3	Marco teórico.....	10
3.1	Contaminación atmosférica urbana	10
3.2	Óxidos de nitrógeno y dióxido de nitrógeno (NO ₂)	11
3.3	Influencia de las condiciones meteorológicas en las concentraciones de NO ₂ ..	12
3.4	Efecto del NO ₂ sobre la salud y el medio ambiente	12
3.5	Monitorización de la calidad del aire	13
4	Metodología.....	15
4.1	Área de estudio	15
4.2	Fuentes de datos	16
4.3	Tratamiento de los datos	17
4.4	Indicadores de evaluación y análisis comparativo	17
4.5	Valores de referencia y criterios normativos	18
5	Análisis de Resultados.....	19
5.1	Caracterización espacial del NO ₂ en el área de estudio.....	19
5.2	Caracterización temporal de NO ₂ en el municipio de Sabadell.....	22
5.3	Superación de valores guía recomendados por la OMS	23
5.4	Evaluación del uso de sensores low-cost para la monitorización del NO ₂ en Sabadell	26
5.5	Potencial de los sensores low-cost y ciencia ciudadana	34
6	Conclusiones.....	35
7	Bibliografía.....	36
8	Anexos.....	39

II. Listado de figuras

Figura 1 - Equipo de referencia MCV de calidad del aire.....	14
Figura 2 - Dispositivo low-cost KUNAK Air PRO de calidad del aire.	14
Figura 3 - Ubicación de los Municipios objeto de estudio.....	15
Figura 4 - Concentración media anual de NO ₂ por Municipio.....	20
Figura 5 - Variación estacional de NO ₂ por Municipio (año estacional)	21
Figura 6 - Variación horaria de NO ₂ Panel A: día laborable y Panel B: No laborable estación oficial.....	23
Figura 7 - Comparación de concentraciones media anual de NO ₂ entre sensores y estación oficial (2023 - 2024).....	26
Figura 8 - Localización de sensores low-cost de NO ₂ y la estación oficial en relación con la intensidad media diaria de tráfico en Sabadell.....	28
Figura 9 - Distribución de las concentraciones de NO ₂ registradas por sensores low-cost y estación oficial en Sabadell (2023 – 2024)	30
Figura 10 - Variabilidad horaria de NO ₂ en periodo invernal por sensores MCV	31
Figura 11 - Variabilidad horaria de NO ₂ en periodo invernal por sensores KUNAK Air Pro	31
Figura 12 -Perfil horario semanal de NO ₂ en el sensor Can Balsach durante febrero de 2024 (Extraído del informe de Calidad Aire Sabadell – junio 2024).....	33
Figura 13 - Variación mensual INVIERNO de NO ₂	39

III. Listado de tablas

Tabla 1 - Características principales de las Estaciones Oficiales de medición de Calidad del aire	16
Tabla 2 - Características de los sensores low-cost de NO ₂ objeto de estudio.....	16
Tabla 3 - Interpretación del coeficiente de correlación (R)	18
Tabla 4 – Marco normativo y valores de referencia para NO ₂	19
Tabla 5 - Concentración media anual y concentración media en periodo invernal de NO ₂ en Sabadell (2019 - 2024)	22
Tabla 6 - Criterios de codificación por colores (% de días de superación)	24
Tabla 7 – Número y porcentaje de días que superan el valor guía diario de NO ₂ (25 µg/m ³) recomendado por la OMS, por municipio y estación (2019-2024).....	25
Tabla 8 - Indicadores de comparación entre sensores low-cost de NO ₂ y la estación oficial en Sabadell.....	27
Tabla 9 - Episodios representativos de concentraciones elevadas de NO ₂ en sensores de tráfico de Sabadell	32
Tabla 10 - Variables meteorológicas mensuales registradas en la estación de Sabadell - Parc Agrari (enero y febrero 2023 y 2024)	32
Tabla 11 - Número y porcentaje de días que superan el valor diario de NO ₂ (50 µg/m ³) propuesto para la Directiva 2008/50/CE, por municipio y estación (2019-2024)	40

IV. Agradecimientos

A mi pareja, por estar a mi lado en todo momento, por su apoyo constante y por demostrarme que el amor también es acompañar, cuidar y sostener.

A mis padres y a mi hermana, por su amor incondicional y por enseñarme que la distancia nunca rompe los lazos que de verdad importan. Gracias por apoyarme en cada decisión y por darme fuerzas de crecer, incluso cuando eso implica estar lejos de casa.

A Mireia por su acompañamiento constante y por el tiempo dedicado a lo largo de este proceso. Su ayuda ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

V. Resumen

La contaminación atmosférica urbana es uno de los principales problemas ambientales en las ciudades, debido a sus efectos negativos sobre la salud humana y la calidad de vida. Entre los distintos contaminantes presentes en el aire, el dióxido de nitrógeno (NO_2) destaca por su estrecha relación con los procesos de combustión, especialmente los asociados al tráfico rodado, y por su relevancia en entornos urbanos densamente poblados.

En este trabajo se analiza el comportamiento del NO_2 en el municipio de Sabadell (en la provincia de Barcelona), considerando su evolución temporal y situándolo en el contexto del entorno supramunicipal del Vallès Occidental. Para ello, se utilizan datos procedentes de estaciones oficiales de la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA) correspondientes al periodo 2019–2024, junto con mediciones obtenidas a partir de sensores low-cost durante los años 2023 y 2024. El análisis se centra en la caracterización espacial y temporal del contaminante, prestando especial atención a la variabilidad estacional y horaria, así como a la comparación con los valores normativos y las recomendaciones sanitarias.

Los resultados muestran un comportamiento temporal similar en los municipios analizados, con concentraciones más elevadas en 2019, un descenso en 2020 y una evolución más estable en los años posteriores. En el caso de Sabadell, se observa una clara estacionalidad, con concentraciones más altas durante el invierno y picos horarios asociados a las horas punta de tráfico en días laborables. Aunque las concentraciones medias anuales cumplen con los valores límite legales vigentes, se registran superaciones frecuentes de los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

La comparación entre los sensores low-cost y la estación oficial de referencia indica que, si bien existen diferencias en las concentraciones absolutas según la ubicación, varios sensores son capaces de reproducir de forma coherente la evolución temporal del NO_2 . Estos resultados ponen de manifiesto el potencial de los sensores low-cost como herramienta complementaria para ampliar la cobertura espacial de la monitorización de la calidad del aire, apoyar iniciativas de ciencia ciudadana y mejorar la comprensión de la contaminación atmosférica a escala local.

VI. Abstract

Urban air pollution is one of the main environmental problems affecting cities, due to its negative impacts on human health and quality of life. Among the various air pollutants, nitrogen dioxide (NO₂) stands out because of its close relationship with combustion processes—particularly those associated with road traffic—and its relevance in densely populated urban environments.

This study analyses the behaviour of NO₂ in the municipality of Sabadell (province of Barcelona), considering its temporal evolution and placing it within the broader supramunicipal context of the Vallès Occidental area. To this end, data from official monitoring stations of the Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA) for the period 2019–2024 are used, together with measurements obtained from low-cost sensors during 2023 and 2024. The analysis focuses on the spatial and temporal characterisation of the pollutant, with particular attention to seasonal and hourly variability, as well as comparisons with regulatory limit values and health-based guidelines.

The results show a similar temporal pattern across the analysed municipalities, with higher concentrations in 2019, a marked decrease in 2020, and a more stable evolution in subsequent years. In the case of Sabadell, a clear seasonal pattern is observed, with higher concentrations during winter and hourly peaks associated with traffic rush hours on working days. Although annual mean concentrations comply with the current legal limit values, frequent exceedances of the guideline values recommended by the World Health Organization are recorded.

The comparison between low-cost sensors and the official reference station indicates that, despite differences in absolute concentration levels depending on location, several sensors are able to reproduce the temporal evolution of NO₂ in a consistent manner. These findings highlight the potential of low-cost sensors as a complementary tool to expand the spatial coverage of air quality monitoring, support citizen science initiatives, and improve the understanding of air pollution at the local scale.

1 Introducción

1.1 Contexto general de la contaminación atmosférica urbana

Actualmente la contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas ambientales en las áreas urbanas, debido a su impacto negativo directamente en la salud humana y la calidad de vida de la población. El crecimiento de las ciudades, el aumento de la movilidad y la intensificación de las actividades relacionadas al consumo energético han incrementado la presencia de contaminantes atmosférico afectando a millones de personas.

Algunos organismos internacionales han señalado que la exposición continuada a contaminantes atmosféricos está estrechamente relacionada con el aumento de las enfermedades respiratorias y cardiovasculares especialmente en áreas urbanas densamente pobladas. Así mismo, la contaminación del aire se considera actualmente como uno de los principales riesgos ambientales para la salud pública a escala global. (World Health Organization, 2021).

En el ámbito urbano, la presencia y acumulación de contaminantes atmosféricos está bastante relacionada con las actividades humanas. Entre las principales fuentes destacan el transporte por carretera, los sistemas de calefacción basados en proceso de combustión y determinadas actividades industriales que pueda haber en la zona. A estas fuentes se le debe sumar factores como las condiciones meteorológicas locales que influyen de manera decisiva en la dispersión de los contaminantes y en determinadas situaciones la aparición de episodios recurrentes de mala calidad del aire (World Health Organization, 2021).

1.2 El NO₂ como contaminante de interés

Dentro del conjunto contaminante presentes en las zonas urbanas, el dióxido de nitrógeno (NO₂) es uno de los más relevantes debido a la relación tan cercana que tiene con fuentes de combustión, especialmente con el tráfico rodado. Este gas se genera principalmente durante procesos de combustión a altas temperaturas y se utiliza habitualmente como un indicador del impacto del transporte sobre la calidad del aire en las ciudades (Doadrio Villarejo, 2022)

Desde el punto de vista de la salud, la exposición al NO₂ se asocia con efectos adversos sobre el sistema respiratorio y puede agravar patologías preexistentes como el asma. Además, el NO₂ desempeña un papel importante en procesos de contaminación secundaria, ya que participa en reacciones fotoquímicas que dan lugar a la formación de otros contaminantes, como el ozono troposférico que también afecta a la salud. Estas características hacen que el NO₂ sea un contaminante de especial interés en los estudios de la calidad de aire (Alberto Bernabeo, 2019; World Health Organization, 2021).

En las últimas décadas, la calidad del aire en las ciudades europeas ha experimentado una mejora progresiva como resultado de desarrollo de políticas ambientales y de avances tecnológicos en el sector del transporte. Sin embargo, el tráfico rodado continúa siendo una de las principales fuentes de emisiones de óxidos de nitrógeno en áreas urbanas, manteniendo al NO₂ como un contaminante problemático en muchas de ellas (World Health Organization, 2021).

1.3 Sensores low-cost y monitorización de la calidad del aire

La evaluación de la calidad del aire se ha basado en redes de estaciones oficiales equipadas con analizadores de referencia de alta precisión. No obstante, estas estaciones suelen presentar una cobertura espacial limitada debido a su elevado coste de instalación y mantenimiento. Aquí es donde los sensores low-cost han surgido como una herramienta complementaria que permite ampliar la red de observaciones y mejorar la caracterización espacial de la contaminación atmosférica en estos entornos urbanos. Esto permite contribuir tanto a estudios científicos como a iniciativas de ciencia ciudadana que permitan involucrar más a la población en la gestión de la calidad (Mahajan et al., 2020a).

En este sentido, el análisis de calidad del aire a escala local resulta fundamental para comprender el comportamiento espacial y temporal de los contaminantes atmosféricos en entornos urbanos. El presente trabajo se centra en el análisis del dióxido de nitrógeno (NO₂) en el municipio de Sabadell, combinando datos procedentes de estaciones oficiales con mediciones obtenidas mediante sensores low-cost. Este enfoque permite analizar la evolución temporal del contaminante y evaluar el potencial de los sensores low-cost como herramienta complementaria para monitorización de calidad del aire en un entorno en concreto.

Por otra parte, este trabajo se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 11 (Ciudades y comunidades sostenibles), en particular con la meta 11.6, que persigue reducir el impacto ambiental de las ciudades, prestando especial atención a la calidad del aire. El análisis de las concentraciones de NO₂ en un entorno urbano contribuye a evaluar la exposición de la población y a apoyar estrategias de mejora de la calidad del aire.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento del dióxido de nitrógeno (NO₂) en el municipio de Sabadell (Barcelona), considerando su variabilidad temporal y el papel de los sensores low-cost como herramienta para la vigilancia/monitorización de la calidad del aire a escala urbana.

2.2 Objetivos específicos

- Analizar la evolución temporal de las concentraciones de NO₂ en distintos municipios del Vallès, al entorno de Sabadell (Barcelona), a partir de las estaciones oficiales, con el fin de contextualizar el caso de estudio.
- Caracterizar el comportamiento estacional y horario del NO₂ en el municipio de Sabadell, con especial atención en el periodo invernal.
- Comparar las concentraciones de NO₂ medidas por sensores low-cost y la estación oficial de referencia en Sabadell, mediante indicadores estadísticos y análisis de coherencia temporal, con el objetivo de evaluar consistencia y carácter complementario de ambas fuentes.

3 Marco teórico

3.1 Contaminación atmosférica urbana

En las áreas urbanas y determinadas zonas industriales el tráfico rodado, representa una de las principales fuentes de emisiones, siendo el transporte por carretera el factor dominante en la degradación de la calidad del aire en ciudades.

La influencia de estas emisiones se refleja en las concentraciones medidas en distintos puntos de las ciudades, donde la localización y el entorno urbano condicionan los niveles registrados de NO₂. Comparaciones entre estaciones de tráfico, industriales y fondo urbano muestran diferencias significativas en sus registros, lo que está asociado tanto a la proximidad a las fuentes emisoras como a la configuración urbana y a las condiciones de dispersión. En estaciones de tráfico se han observado concentraciones invernales que pueden superar los 90 µg/m³ de NO₂ (Paraschiv & Paraschiv, 2019), mientras que las estaciones situadas en entornos menos expuestos presentan valores sensiblemente inferiores.

En el contexto español, diversos estudios han demostrado que, a pesar de las reducciones sostenidas en las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), las concentraciones urbanas de NO₂ continúan representando un problema importante en la calidad del aire. En ciudades como Barcelona y Madrid se han observado descensos de NO_x del orden del 45 - 55% entre 2003 y 2014, mientras que las reducciones de NO₂ han sido más moderadas, alrededor del 24 - 30%. Como consecuencia, las concentraciones medias anuales de NO₂ en estaciones de tráfico recurrentemente superan el valor límite anual de 40 µg/m³ (Casquero-Vera et al., 2019).

En el período de restricciones de movilidad durante la pandemia de COVID - 2019 refuerzan la relación directa entre el tráfico rodado y las concentraciones de NO₂. Durante estos episodios de confinamiento más estrictos se registraron reducciones de hasta 30-60% en las concentraciones de NO₂ en ciudades españolas, lo que confirma el papel dominante de la movilidad en la contaminación atmosférica (Bañuelos-Gimeno et al., 2023; Querol et al., 2021).

En Sabadell, los datos recogidos en el Pla d'Acció per a la Millora de la Qualitat de l'Aire de Sabadell ponen de manifiesto el papel claramente dominante del tráfico rodado como fuente de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) en el municipio. En 2014, las emisiones asociadas al uso del vehículo privado alcanzaron las 788,61 t/año de NO_x, una cifra muy superior a la correspondiente al transporte público en autobús, que se situó en 27,60 t/año. Dentro del tráfico privado, las mayores emisiones se concentran en las vías de conexión y en las vías distribuidoras, con valores de 284,11 t/año y 304,93 t/año de NO_x, respectivamente, mientras que las vías locales presentan contribuciones más moderadas (136,18 t/año).

Este reparto de emisiones refleja la influencia directa de la intensidad del tráfico y del tipo de vía sobre los niveles de contaminación, y apoya la interpretación de que las concentraciones elevadas de NO₂ observadas en distintos puntos urbanos de Sabadell están estrechamente relacionadas con la movilidad rodada (Ajuntament de Sabadell, 2023).

3.2 Óxidos de nitrógeno y dióxido de nitrógeno (NO₂)

Dentro del conjunto de contaminantes atmosféricos presentes en las áreas urbanas, los óxidos de nitrógeno (NO_x) son un grupo especialmente relevante. Este grupo está formado principalmente por el monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂).

Los óxidos de nitrógeno se emiten mayormente en forma de monóxido de nitrógeno (NO), mientras que una fracción significativa de dióxido de nitrógeno (NO₂) presente en la atmósfera se forma de manera secundaria mediante procesos de oxidación atmosférica. En particular, el NO reacciona rápidamente con el ozono, dando lugar al NO₂, así se establece un equilibrio dinámico NO-NO₂-O₃ que depende de la disponibilidad de oxidantes, la radiación solar y las condiciones de dispersión atmosférica. Este carácter reactivo hace que estas concentraciones de NO₂ no dependan únicamente de las emisiones directas sino también de los procesos fotoquímicos locales que actúan, eso explica su elevada variabilidad espacial y temporal en entornos urbanos (Casquero-Vera et al., 2019; Pültz et al., 2025).

Estudios de atribución de fuentes realizados en entornos urbanos europeos indican que el tráfico rodado representa, de media entre el 40% y 60% de las concentraciones de NO₂ en fondos urbanos, alcanzando valores superiores en grandes ciudades. En casos como Alemania, se ha estimado una contribución media del tráfico del 41 % con máximos cercanos a 59% mientras que la combustión residencial aporta alrededor del 9% en promedio anual, el cual puede incrementarse en invierno con valores de hasta 18% en condiciones frías (Pültz et al., 2025).

Además de su relevancia como contaminante primario, el NO₂ desempeña un papel fundamental en los procesos de contaminación atmosférica secundaria. En presencia de la radiación solar, el NO₂ participa en reacciones fotoquímicas que conducen a la formación de ozono troposférico, uno de los principales contaminantes secundarios presentes en entornos urbanos. Este papel del NO₂ como precursor del ozono refuerza su importancia en la dinámica de la calidad del aire y justifica su consideración como contaminante clave a controlar.

3.3 Influencia de las condiciones meteorológicas en las concentraciones de NO₂

Haciendo énfasis en el periodo invernal, las concentraciones de NO₂ en entornos urbanos no están determinadas únicamente por la cantidad de emisiones generadas, sino también por la forma en que la atmósfera favorece o dificulta su dispersión. En esta época del año son frecuentes situaciones de atmósfera estable asociadas a episodios de inversión térmica, en las que la temperatura aumenta con la altura en los primeros niveles de la atmósfera. Estas condiciones reducen significativamente la altura de la capa límite atmosférica, que pasa de ser poco profunda y limita la mezcla vertical del aire. Como consecuencia, los contaminantes emitidos a nivel del suelo, como el NO₂, quedan confinados en una capa de aire a escasa altura y se dispersan con menor eficiencia (Wallace & Kanaroglou, 2009).

Este efecto se ve reforzado cuando la velocidad de los vientos es baja, ya que se reduce también la dispersión horizontal, favoreciendo la acumulación progresiva de NO₂ cerca de la superficie. Varios estudios han demostrado que, bajo estas condiciones invernales, pueden producirse concentraciones elevadas de NO₂ incluso si no hay incrementos significativos en las emisiones, debido a que la meteorología juega un papel predominante (Wallace & Kanaroglou, 2009).

3.4 Efecto del NO₂ sobre la salud y el medio ambiente

La importancia del NO₂ como contaminante atmosférico que está vinculado a los efectos adversos a la salud se debe a la evidencia científica que existe sobre ello. La Organización Mundial de la Salud (OMS) identifica el NO₂ como contaminante asociado principalmente a impactos sobre el sistema respiratorio, especialmente en entornos urbanos donde hay una exposición continuada.

La exposición al dióxido de nitrógeno (NO₂) tanto a corto como a largo plazo, se ha relacionado con un aumento de síntomas respiratorios, agravamiento de enfermedades ya preexistentes como el asma y un incremento de las hospitalizaciones por causas respiratorias. Estos efectos son particularmente relevantes para los niños, los ancianos y otros grupos vulnerables.

Diversos estudios epidemiológicos han demostrado que incluso a exposiciones a corto plazo a concentraciones moderadas de NO₂ se asocian con incrementos importantes en la mortalidad. En el contexto español, el estudio de (Linares et al., 2018) analizó datos de varias provincias españolas durante 2000 a 2009 y observó que incrementos de 10 µg/m³ en las concentraciones diarias de NO₂ se asocia a aumentos estadísticamente significativos de la mortalidad por causas naturales, circulatorias y respiratorias. En España se estima que más de 10.000 muertes anuales son por este contaminante (Linares et al., 2018).

Con el objetivo de proteger la salud de la población, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido valores guía específicos para este contaminante. La OMS recomienda un valor límite anual de 10 µg/m³ y un valor horario de 200 µg/m³, definido como concentración máxima la cual no debe superarse más de una vez al año. Estos valores se basan en la evidencia epidemiológica disponible y ponen en manifiesto la necesidad de evaluar y reducir la exposición al NO₂, especialmente en entornos urbanos.

3.5 Monitorización de la calidad del aire

La evaluación de la calidad del aire en entornos urbanos se basa en utilizar redes de monitorización que permiten medir de forma continuada las concentraciones de contaminantes atmosféricos.

Tradicionalmente, esta monitorización se realiza con redes oficiales compuestas por estaciones fijas equipadas con analizadores de referencia, que proporcionan datos de alta calidad y fiabilidad. No obstante, el número limitado de estaciones y su carácter fijo hacen que, en muchas ocasiones, no sea posible captar con detalle la variabilidad espacial de contaminantes como el NO₂ dentro de la misma ciudad.

En Catalunya, la monitorización oficial de calidad del aire se realiza a través de la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA), que integra estaciones fijas distribuidas por el territorio y clasificadas según su tipo de entorno y tipología de exposición, como estaciones de tráfico, fondo urbano o industrial. Estas estaciones utilizan métodos de referencia para la medición de los contaminantes, garantizando una elevada calidad y fiabilidad de los datos obtenidos.

La información generada por la XVPCA permite analizar la evolución temporal de la calidad del aire, identificar episodios de contaminación y disponer de una visión general del estado de la atmósfera a escala regional y urbana.

Igualmente, debido a la limitada densidad de estaciones, esta red no siempre refleja diferencias existentes a pequeña escala, especialmente en zonas próximas a vías con alta intensidad de tráfico o áreas con una configuración urbana compleja (Departament de Territori, Habitatge i Transició Ecològica, 2024).

En los últimos años, los sensores low-cost han abierto nuevas posibilidades para la monitorización de la calidad del aire en entornos urbanos, estos dispositivos, de menor tamaño y coste que las estaciones oficiales de referencia, permiten desplegar un mayor número de localizaciones, facilitando así el análisis de variabilidad intraurbana de la contaminación atmosférica.

Estos sensores no pretenden sustituir a las estaciones oficiales, sino complementarlas, aportando información adicional a escala local. En el caso de Sabadell, la red municipal forma parte de la estrategia de monitorización orientada a complementar la información proporcionada por la red oficial. A continuación, se describen los sensores que componen esta red municipal de apoyo y sus principales características:

Figura 1 - Equipo de referencia MCV de calidad del aire.



Sensor analizador de NO/NO₂/NO_x es utilizado en las estaciones de referencia MCV correspondiente al modelo T-200 para análisis de calidad del aire, basándose en el principio de detección por quimioluminiscencia. Este equipo permite obtener mediciones precisas y fiables incluso a niveles bajos de NO_x, con un rango ajustable desde 0 - 50 ppb hasta 0 -20000 ppb. El equipo incorpora una pantalla táctil y dispone de conexiones de comunicación como Ethernet, RS-232 que es una conexión por red y también USB, junto con sistemas de compensación por temperatura y presión y posibilidad de verificación interna (MCV, n.d.).

Figura 2 - Dispositivo low-cost KUNAK Air PRO de calidad del aire.



Este sensor permite registrar de forma simultánea variables meteorológicas (temperatura y humedad relativa), concentraciones de gases como CO, NO, NO₂, NO_x y O₃, partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, así como nivel sonoro equivalente (LAeq). Su diseño es compacto y tiene una capacidad de transmitir remotamente los datos, esto lo hace adecuado para instalaciones en múltiples puntos de la ciudad (KUNAK Technologies, n.d.).

A continuación, se describen las fuentes de datos utilizadas y la metodología aplicada para analizar las concentraciones del NO₂ en el área de estudio. Se detallan las características de los datos procedentes de las estaciones oficiales y sensores low-cost, así como los criterios empleados para el tratamiento, la clasificación y el análisis temporal de la información.

4.1 Área de estudio

Con el objetivo de contextualizar el comportamiento del NO₂ en Sabadell, el análisis comparativo a escala supramunicipal incluye, además de Sabadell, los municipios de Rubí, Barberá del Vallés, Santa Perpetua de Mogoda y Mollet del Vallés.

4.2 Fuentes de datos

A continuación, se describen las diferentes fuentes de información a partir de las cuales se obtuvieron los datos utilizados en el análisis de calidad del aire y de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) en el área de estudio.

4.2.1 Estaciones oficiales de medición de calidad del aire

Los datos de concentración de NO₂ procedentes de las estaciones oficiales fueron obtenidos de la Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA), gestionada por la Generalitat de Catalunya. En este análisis se seleccionaron varias estaciones representativas de distintos entornos urbanos y suburbanos. En la Tabla 1 se resumen las principales características de las estaciones oficiales consideradas, incluyendo su localización geográfica y tipo de entorno en el que se encuentran.

Tabla 1 - Características principales de las Estaciones Oficiales de medición de Calidad del aire

Estación	Tipo de estación	Entorno	Ubicación	
			Latitud	Longitud
Barberá del Vallés	Background	Urbano	41.512684	2.1253984
Mollet del Vallés	Tráfico	Suburbano	41.549183	2.2120984
Sabadell	Tráfico	Urbano	41.561214	2.1011107
Santa Perpetua de Mogoda	Tráfico	Suburbano	41.526722	2.183884
Mollet del Vallés	Tráfico	Suburbano	41.549183	2.2120984
Rubí	Background	Urbano	41.492115	2.0424972

Fuente: (Generalitat de Catalunya, n.d.)

4.2.2 Sensores low-cost

Además de los datos provenientes de las estaciones oficiales, se utilizaron datos de monitorización urbana complementaria obtenidos de la red municipal MCV y de sensores comerciales KUNAK AIR Pro, instalados en distintos puntos del municipio de Sabadell. Estas fuentes permiten analizar la variabilidad espacial de las concentraciones de NO₂ a escala urbana y complementar la información proporcionada por la red oficial.

Tabla 2 - Características de los sensores low-cost de NO₂ objeto de estudio

Sensor	Tipo de equipo	Entorno	Dirección	Ubicación	
				Latitud	Longitud
Centre Cívic Creu de Barberà	MCV (referencia)	Tráfico	Plaça Castelao, 1	41.526906	2.120522
Can Balsach	MCV (referencia)	Tráfico	Ctra. Prats de Lluçanès, 2	41.555561	2.102301
Can Marcet	MCV (referencia)	Tráfico	C/ Rui-Sec, 54	41.541538	2.099472
Centre Cívic Sant Oleguer	Kunak AIR Pro	Tráfico	C/ Sol i Padris, 93	41.537610	2.118986
Radio Sabadell	Kunak AIR Pro	Tráfico	C/ Doctor Puig, 18	41.549004	2.109012
Centre Cívic Can Rull	Kunak AIR Pro	Tráfico	C/ Sant Isidor, 51	41.553864	2.085146
Casal Pere Quart	Kunak AIR Pro	Tráfico	Rambla, 69	41.544334	2.110421
Ajuntament	Kunak AIR Pro	Fondo urbano	Plaça Sant Roc	41.546348	2.108517

Fuente: (4Esfera, 2024)

4.3 Tratamiento de los datos

Los datos obtenidos a partir de las fuentes anteriormente mencionadas fueron sometidos a un tratamiento previo con el objetivo de garantizar su calidad y comparabilidad antes del análisis. A continuación, se describen los criterios que se establecieron para dar como válidos los valores.

4.3.1 Criterios y validación de datos.

Con el fin de garantizar la calidad y representatividad de los datos analizados, se aplicaron criterios de validación tanto a escala diaria como anual descrito a continuación:

- Validez diaria: Un día se consideró válido cuando disponía de al menos el 75% de las mediciones horarias, equivalente a un mínimo de 18 horas de datos sobre 24 horas.
- Validez anual: Un año se consideró válido cuando contaba con datos válidos en al menos el 75%, de acuerdo con el criterio de validez diaria anteriormente descrito.

La aplicación de estos criterios para las estaciones oficiales analizadas muestra que para el periodo de 2019 a 2024, presentan porcentajes medios de días validos superiores al 95% lo que garantiza su representatividad.

Por otra parte, los sensores también fueron sometidos a estos criterios de validación obteniendo un porcentaje de días validos del 90% para el periodo 2023 y 2024.

4.3.2 Periodos de estudio y agregación temporal

El periodo de análisis considerado para estaciones oficiales de calidad del aire abarca un total de seis años, comprendido es de 2019 a 2024. El caso de los sensores low-cost el periodo de estudio se limita a dos años, entre 2023 y 2024.

Para el análisis estacional, se definió el periodo de invierno considerado los meses de diciembre del año anterior y enero y febrero del año siguiente, con el fin de representar adecuadamente la continuidad climática y atmosférica de la estación de invierno. Esta definición se tuvo en cuenta tanto en la agregación de los datos como en los análisis comparativos posteriores.

4.4 Indicadores de evaluación y análisis comparativo

Con el fin de evaluar el grado de coherencia entre concentraciones de NO₂ registradas por la estación oficial y los sensores low-cost, se realizó un análisis comparativo utilizados los datos correspondientes a los periodos con registros simultáneos. En el caso de los sensores low-cost se cuenta con datos disponibles desde el año 2023 a 2024 y centrándose el análisis de estos indicadores en la estación de invierno.

La comparación entre series temporales se realizó mediante el uso de indicadores estadísticos complementarios, que permiten evaluar tanto la coherencia temporal como las diferencias sistemáticas entre los sistemas de medición. En concreto, se utilizaron el coeficiente de correlación lineal de Pearson (R), el sesgo medio (BIAS) y el error medio absoluto (MAE).

A continuación, se realiza una descripción de cada indicador utilizado:

- **Correlación lineal de Pearson (R):** se utiliza para evaluar la coherencia temporal entre ambas series de datos. Esta métrica permite analizar en qué medida las variaciones de concentraciones registradas por sensores low-cost siguen el mismo patrón temporal que la estación oficial. Así mismo, una correlación elevada indicaría que los sensores son capaces de reproducir adecuadamente la dinámica temporal de NO₂ también registrada por la estación oficial. Con el fin de facilitar la interpretación de los resultados, se emplean rangos orientativos del coeficiente de correlación, ampliamente utilizados en la literatura y esto permite clasificar el grado de coherencia temporal entre la estación oficial y cada sensor low-cost. En la Tabla 3 se presenta la interpretación:

Tabla 3 - Interpretación del coeficiente de correlación (R)

Rango del Coeficiente R	Interpretación
$R < 0,4$	Baja coherencia temporal
$0,4 \leq R < 0,7$	Coherencia temporal moderada
$R \geq 0,7$	Buena coherencia temporal

Fuente: (Schober & Schwarte, 2018)

- **Sesgo medio (BIAS):** se calcula como la diferencia media entre las concentraciones registradas por los sensores low-cost y las registradas por la estación oficial. Este indicador permite comprobar si los sensores low-cost tienden a medir valores más altos o bajos que la estación oficial de forma sistemática. Por eso, el análisis de sesgo es útil para evaluar hasta qué punto las medidas de los sensores se desvían de la referencia y si existe una tendencia clara a la sobreestimación o infraestimación de las concentraciones.
- **Error medio absoluto (MAE):** indica la magnitud media de las diferencias entre ambos sistemas de medición, expresada en términos absolutos. A diferencia del sesgo, el MAE permite cuantificar el error medio, proporcionando una estimación directa del grado de discrepancia entre las concentraciones medias por los sensores low-cost y la estación oficial.

4.5 Valores de referencia y criterios normativos

Para la evaluación de los resultados obtenidos se consideran los valores límite establecidos por la normativa europea vigente, los valores propuestos en la futura Directiva europea (2030) y los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la salud (OMS).

Realizando una comparación entre los marcos normativos y valores de referencia se observa que las recomendaciones de la OMS establecen umbrales significativamente más restrictivos que los valores legales en vigor. En este sentido, la nueva Directiva (UE) 2024/2881 introduce una reducción sustancial del valor límite anual de NO₂ y establece por primera vez, un valor límite diario, aunque este último sigue siendo superior a los niveles recomendados por la OMS.

Tabla 4 – Marco normativo y valores de referencia para NO₂

Métrica temporal	Valor límite/guía (µg/m³)			
	Real decreto 102/2011	Directiva 2008/50/CE	Directiva 2024/2881	OMS
Media diaria	-	-	50	25 ⁽¹⁾
Media anual	40	40	20	10 ⁽²⁾
Observaciones	Límite legal actualmente exigible en España	Límite legal vigente a nivel europeo	Aplicación progresiva desde 2026 y obligatoria en 2030	(1) Percentil 99 (3-4 días de superación/año) referencia sanitaria (2) Valor guía sanitario, no vinculante legalmente

Fuente: Elaboración propia a partir del Real Decreto 102/2011; Directiva 2008/50/CE; Directiva (UE) 2024/2811; y Organización Mundial de la Salud (2021).

5 Análisis de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis de las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO₂) en el área de estudio. El análisis se estructura en dos apartados, una caracterización general del comportamiento de NO₂ en los distintos municipios analizados y un estudio detallado del municipio de Sabadell, con especial énfasis en la variabilidad temporal y el cumplimiento de los valores de referencia establecidos por la normativa legal vigente.

Por otra parte, se evaluará el uso de sensores low-cost como herramienta complementaria a las estaciones oficiales de calidad del aire, analizando su capacidad para reproducir los patrones temporales y su potencial para mejorar la resolución espacial y fomentar la ciencia ciudadana.

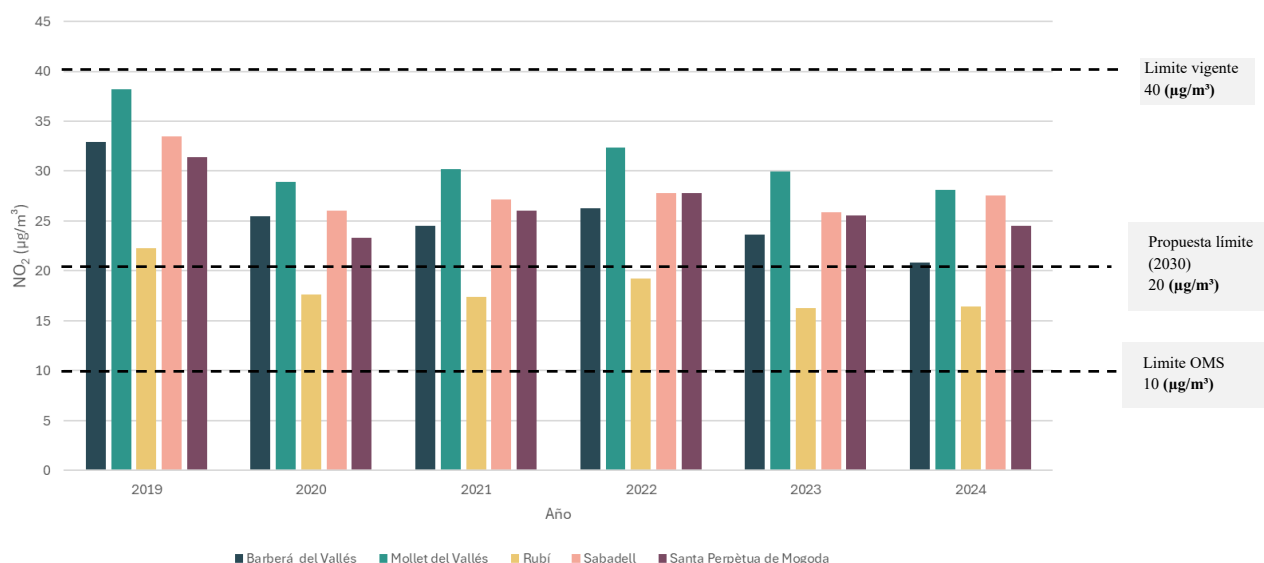
5.1 Caracterización espacial del NO₂ en el área de estudio

5.1.1 Distribución de las concentraciones medias anuales por Municipio

La evolución de las concentraciones medias anuales de NO₂ durante el periodo 2019 - 2024 muestra un patrón común en los municipios analizados, con valores más elevados en 2019 y una disminución generalizada a partir de 2020, seguida de una evolución relativamente más estable en los años siguientes (Figura 4).

Desde el punto de vista espacial, Mollet del Vallès es el municipio que registra de forma más consistente las concentraciones medias anuales más altas a lo largo del periodo de estudio. Sabadell y Santa Perpètua de Mogoda presentan valores intermedios, con diferencias moderadas entre ambos municipios, siendo las 3 estaciones de tráfico. Por otro lado, Barberà del Vallès muestra valores comparables a este grupo intermedio, siendo una estación de fondo urbano, y la estación de fondo urbano de Rubí muestra valores inferiores.

Figura 4 - Concentración media anual de NO₂ por Municipio



En general se observa un comportamiento similar entre municipios que sugiere una influencia de factores comunes a escala regional. En entornos urbanos y metropolitanos como el Vallés Occidental, se identifica el tráfico rodado como la principal fuente de NO₂. Además, la época de invierno se caracteriza por tener concentraciones máximas de este contaminante, ya que se relaciona con procesos de combustión (calefacción, tráfico) y condiciones meteorológicas que favorecen su acumulación.

El descenso generalizado de las concentraciones registradas en 2020 refuerza esta interpretación, ya que diversos estudios han documentado reducciones significativas de del NO₂ en áreas metropolitanas debido a la disminución de la movilidad y la actividad urbana ocasionada por la pandemia COVID-19, mientras que la influencia de la meteorología resulta secundaria frente al fuerte control ejercido por las emisiones urbanas. (Lemus-Canovas, 2021). El comportamiento es común en todos los municipios analizados sugiere que estos episodios de mayores concentraciones responden a mecanismos de acumulación compartidos a escala regional, más que a factores locales específicos.

En este contexto, los valores obtenidos en Sabadell se interpretan como parte de una dinámica regional común y que está condicionada por la intensidad de las emisiones asociadas a la movilidad urbana como también a los factores meteorológicos que afectan simultáneamente los municipios del entorno. Este enfoque regional permite contextualizar adecuadamente los resultados locales y sienta una base para el análisis detallado del comportamiento de NO₂ en Sabadell el cual se desarrolla en los apartados siguientes.

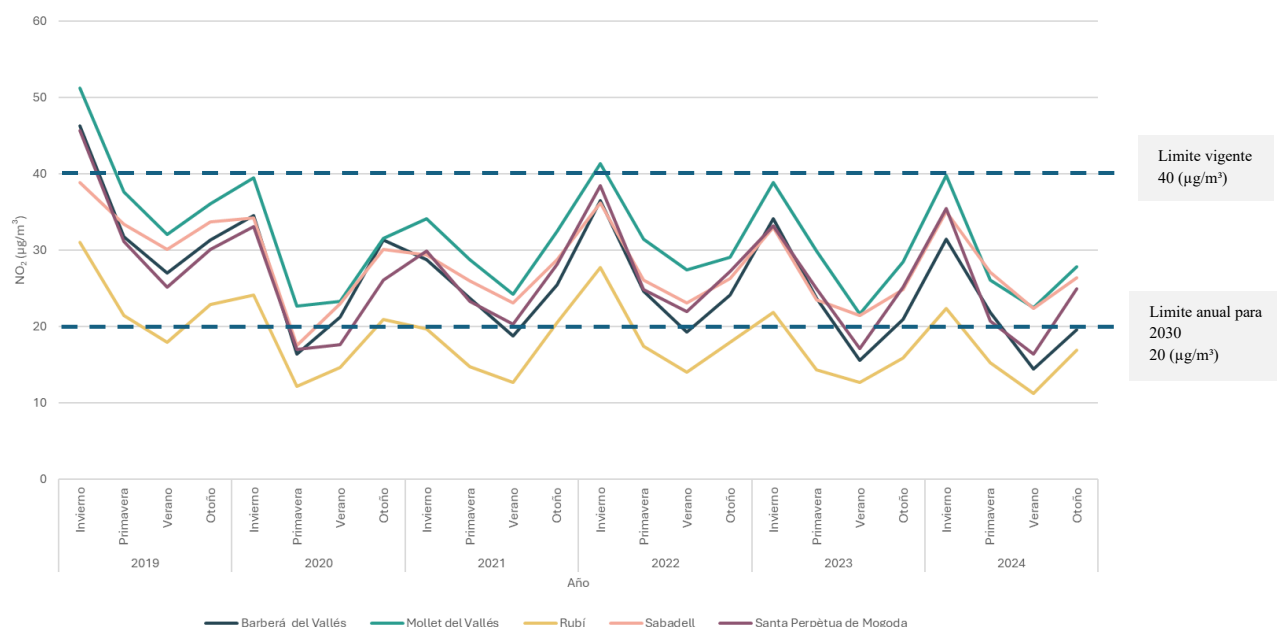
Por otra parte, la Figura 4 incorpora, además de las concentraciones medias anuales de NO_2 , los principales valores normativos y de guía sanitarios. Se observa que, aunque en el periodo analizado las concentraciones se sitúan mayormente por debajo del límite anual vigente ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en todos municipios y años los valores superan ampliamente las recomendaciones de la OMS, que fija un valor de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Así mismo, la comparación con el umbral propuesto para 2030 demuestra que, aunque actualmente se cumple con la norma, serían necesarias reducciones adicionales para alinearse a objetivos regulatorios futuros para 2030.

5.1.2 Variabilidad estacional de las concentraciones de NO_2 por municipio.

La evolución estacional de las concentraciones medias de NO_2 por municipio durante el periodo 2019 – 2024 muestra que, en todos los casos, las concentraciones más elevadas se registran en invierno, mientras que los valores más bajos se observan en verano, con niveles intermedios durante la primavera y el otoño (Figura 5). Este patrón se mantiene de forma estable a lo largo de los años analizados, lo que demuestra la consistencia temporal de comportamiento estacional del NO_2 .

A pesar de este comportamiento estacional común, se observan diferencias en la magnitud de las concentraciones entre municipios. Rubí presenta los niveles más bajos y una variación estacional más moderada, mientras que Mollet del Vallès registra las concentraciones más altas y los incrementos invernales más marcados. Sabadell, Barberà del Vallès y Santa Perpètua de Mogoda muestran valores intermedios y un comportamiento estacional muy similar entre ellos.

Figura 5 - Variación estacional de NO_2 por Municipio (año estacional)



5.2 Caracterización temporal de NO₂ en el municipio de Sabadell

Con el objetivo de profundizar el comportamiento de NO₂ a escala local, se analizó la evolución temporal de las concentraciones registradas por la estación oficial en el municipio de Sabadell, donde se consideran diferentes escalas temporales: anual, estacional y diaria.

5.2.1 Variabilidad anual y estacional (invierno) en Sabadell

Las concentraciones medias anuales de NO₂ en Sabadell muestran una evolución temporal marcada por un valor máximo en 2019 y un descenso claro en 2020. En los años posteriores, las concentraciones presentan ligeras variaciones interanuales, manteniéndose relativamente estables sin recuperar los niveles previos a 2020.

La evolución de las concentraciones medias anuales y las concentraciones medias durante el periodo invernal se resumen en la Tabla 5, donde se aprecia la persistencia de valores elevados durante esta estación a lo largo de todo el periodo analizado.

Tabla 5 - Concentración media anual y concentración media en periodo invernal de NO₂ en Sabadell (2019 - 2024)

Año	Concentración Media anual NO ₂ (µg/m ³)	Concentración media invernal de NO ₂ (µg/m ³)
2019	33,45	36,6
2020	26,05	33,4
2021	27,14	30,5
2022	27,81	35,8
2023	25,91	34,4
2024	27,54	34,2

Las concentraciones elevadas de NO₂ observadas en invierno no dependen únicamente de la intensidad de emisiones generadas por la actividad urbana, sino que esta modulada de forma significativa por las condiciones meteorológicas locales. Durante el invierno se suelen presentar situaciones de estabilidad atmosférica, caracterizadas por baja de velocidad de vientos y una limitada dispersión vertical que favorece la acumulación de contaminantes en el entorno urbano.

Diversos estudios señalan que, bajo condiciones invernales de estabilidad atmosférica, la altura de la capa límite se reduce y la ventilación atmosférica es menos eficiente, lo que dificulta la dispersión del NO₂ y favorece su acumulación cerca de la superficie. En grandes ciudades, se ha observado que estas situaciones pueden dar lugar a episodios persistentes de contaminación, incluso sin incrementos en las emisiones, debido al papel dominante de la meteorología en la dispersión de los contaminantes. (Martilli et al., 2021)

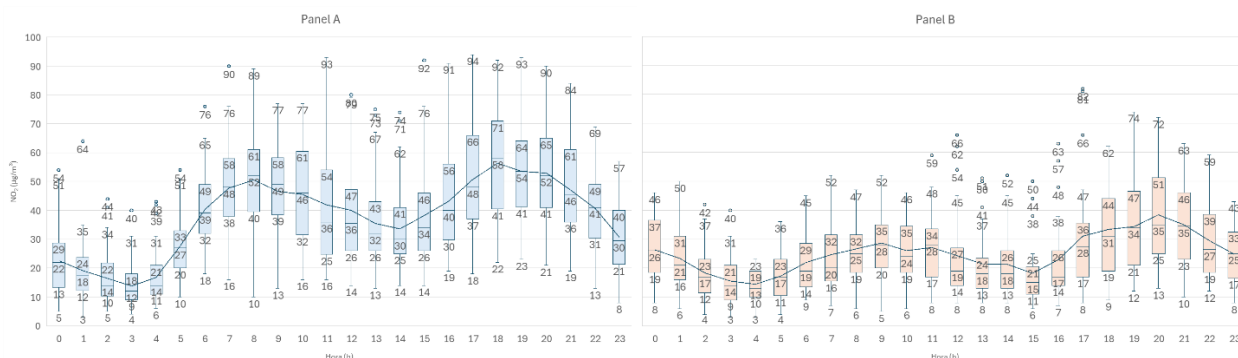
Este comportamiento es coherente con los resultados obtenidos en este análisis, donde los episodios de mayor concentración de NO₂ coinciden con periodos invernales caracterizados por estos sucesos atmosféricos.

5.2.2 Perfil horario de las concentraciones de NO₂ en periodo invernal

Durante el periodo invernal, las concentraciones de NO₂ presentan un marcado patrón horario que difiere claramente entre días laborables y no laborables (Figura 6). En los días laborables (Panel A) se observa una mayor variabilidad de los valores horario, con rangos de concentraciones más amplios y la aparición de picos bien definidos durante las horas punta de la mañana (entre las 7 y las 8h) y de la tarde (alrededor de las 17h), asociado previsiblemente a la intensidad del tráfico y actividad urbana. Por el contrario, en los días no laborables (Panel B) las concentraciones muestran un comportamiento más homogéneo a lo largo del día, con una menor dispersión y valores máximos generalmente bajos.

Para analizar este comportamiento horario se utiliza una representación que permite analizar la dispersión de las concentraciones en cada franja horaria, mostrando no solo los valores centrales, sino también la amplitud de los rangos y la presencia de valores elevados. De este modo, es posible identificar horas con mayor variabilidad, especialmente durante los días laborables y aquellas en las que las concentraciones se mantienen más estables y así poder comparar mejor los días laborables y no laborables.

Figura 6 - Variación horaria de NO₂ Panel A: día laborable y Panel B: No laborable estación oficial



5.3 Superación de valores guía recomendados por la OMS

La Tabla 7 muestra los porcentajes de días en los que se superó el valor guía diario de NO₂ recomendando por la OMS (25 µg/m³) entre 2019 y 2024. Los resultados evidencian superaciones frecuentes en todos los municipios analizados, con porcentajes especialmente elevados durante meses de invierno.

En varios municipios, los valores invernales superan habitualmente el 75 % de los días e incluso alcanzan porcentajes superiores al 90% en determinados años y estaciones, como ocurre en Mollet del Vallès y Santa Perpètua de Mogoda. En contraste, Rubí presenta de forma generalizada los porcentajes más bajos de superación, con valores mayoritariamente inferiores al 25–30 %, especialmente en los años más recientes. Sabadell y Barberà del Vallès muestran un comportamiento intermedio, con porcentajes elevados en invierno, pero más moderados en otros periodos del año.

Estos resultados ponen de manifiesto una marcada variabilidad espacial y estacional, siendo el periodo invernal el que concentra los mayores niveles de superación del valor guía diario de NO₂.

Criterios de codificación de colores

Los colores empleados en la Tabla 6 permiten identificar rápidamente el nivel de superación del valor diario de NO₂ y poder comparar fácilmente las diferencias entre municipios, estaciones y años analizados.

Tabla 6 - Criterios de codificación por colores (% de días de superación)

Color	Rango	Definición
	>75%	Superación muy alta
	50 – 75%	Superación alta
	25 – 50%	Superación moderada
	<25%	Superación baja

Tabla 7 – Número y porcentaje de días que superan el valor guía diario de NO₂ (25 µg/m³) recomendado por la OMS, por municipio y estación (2019-2024)

Municipio	2019			2020			2021			2022			2023			2024		
	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%
Barberá del Vallés																		
Invierno	88	73	83%	91	67	74%	90	59	66%	87	76	87%	81	63	78%	91	46	51%
Otoño	90	61	68%	86	62	72%	89	44	49%	83	33	40%	90	27	30%	91	20	22%
Primavera	90	63	70%	89	14	16%	75	32	43%	91	42	46%	92	38	41%	91	29	32%
Verano	86	44	51%	80	21	26%	88	12	14%	86	22	26%	91	7	8%	92	1	1%
TOTAL	354	241	68%	346	164	47%	342	147	43%	347	173	50%	354	135	38%	365	96	26%
Mollet del Vallés																		
Invierno	90	88	98%	91	78	86%	86	74	86%	83	81	98%	85	82	96%	91	82	90%
Otoño	91	78	86%	91	69	76%	91	72	79%	65	50	77%	89	54	61%	91	60	66%
Primavera	91	77	85%	92	35	38%	87	56	64%	88	69	78%	91	69	76%	91	47	52%
Verano	91	70	77%	84	28	33%	91	39	43%	91	50	55%	92	25	27%	92	27	29%
TOTAL	363	313	86%	358	210	59%	355	241	68%	327	250	76%	357	230	64%	365	216	59%
Rubí																		
Invierno	82	48	59%	87	35	40%	88	32	36%	89	53	60%	89	36	40%	89	32	36%
Otoño	87	40	46%	89	29	33%	91	28	31%	84	17	20%	89	8	9%	90	15	17%
Primavera	86	27	31%	90	7	8%	75	5	7%	92	18	20%	72	3	4%	90	14	16%
Verano	92	14	15%	90	12	13%	92	4	4%	86	7	8%	91	2	2%	86	1	1%
TOTAL	347	129	37%	356	83	23%	346	69	20%	351	95	27%	341	49	14%	355	62	17%
Sabadell																		
Invierno	90	71	79%	90	71	79%	89	61	69%	90	77	86%	86	65	76%	91	71	78%
Otoño	91	70	77%	91	64	70%	90	60	67%	91	47	52%	91	48	53%	90	53	59%
Primavera	91	72	79%	90	15	17%	92	46	50%	89	46	52%	92	39	42%	92	49	53%
Verano	90	59	66%	91	34	37%	85	31	36%	92	30	33%	92	29	32%	92	32	35%
TOTAL	362	272	75%	362	184	51%	356	198	56%	362	200	55%	361	181	50%	365	205	56%
Santa Perpètua de Mogoda																		
Invierno	80	75	94%	91	71	78%	88	65	74%	89	78	88%	79	64	81%	91	74	81%
Otoño	90	64	71%	91	52	57%	89	54	61%	90	53	59%	90	44	49%	91	46	51%
Primavera	92	68	74%	91	12	13%	75	24	32%	90	44	49%	90	50	56%	74	19	26%
Verano	92	45	49%	92	13	14%	77	17	22%	92	27	29%	83	9	11%	69	4	6%
TOTAL	354	252	71%	365	148	41%	329	160	49%	361	202	56%	342	167	49%	325	143	44%

***Total:** número de días con datos válidos.

***Excede:** número de días con concentraciones diarios de NO₂ > 25

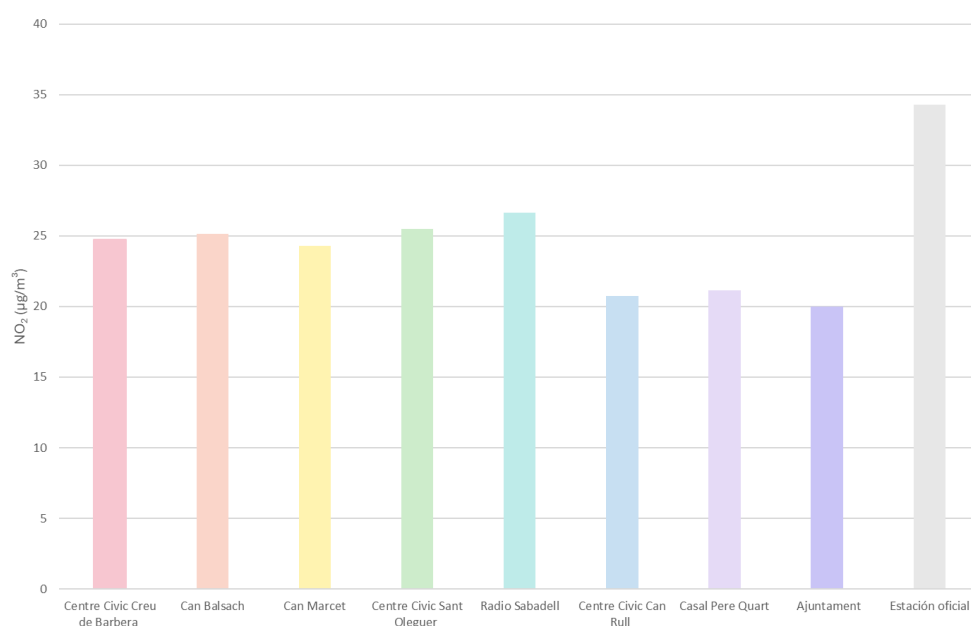
***%:** porcentaje de días de superación respecto al total.

5.4 Evaluación del uso de sensores low-cost para la monitorización del NO₂ en Sabadell

5.4.1 Comparación de concentración media de NO₂ entre sensores low-cost y estación oficial

La Figura 7 muestra la concentración media de NO₂ registrada por los sensores low-cost y la estación oficial durante el periodo 2023 – 2024. La estación oficial presenta un valor medio más elevado, mientras que los sensores registran concentraciones medias inferiores (alrededor de 21 – 27 µg/m³). Estas diferencias se deben a que la media anual integra periodos con comportamientos temporales distintos, así como a la diferente localización y representatividad de los puntos de medida.

Figura 7 - Comparación de concentración media anual de NO₂ de sensores low-cost y estación oficial (2023 - 2024)



5.4.2 Indicadores estadísticos de comparación entre sensores low-cost y estación oficial

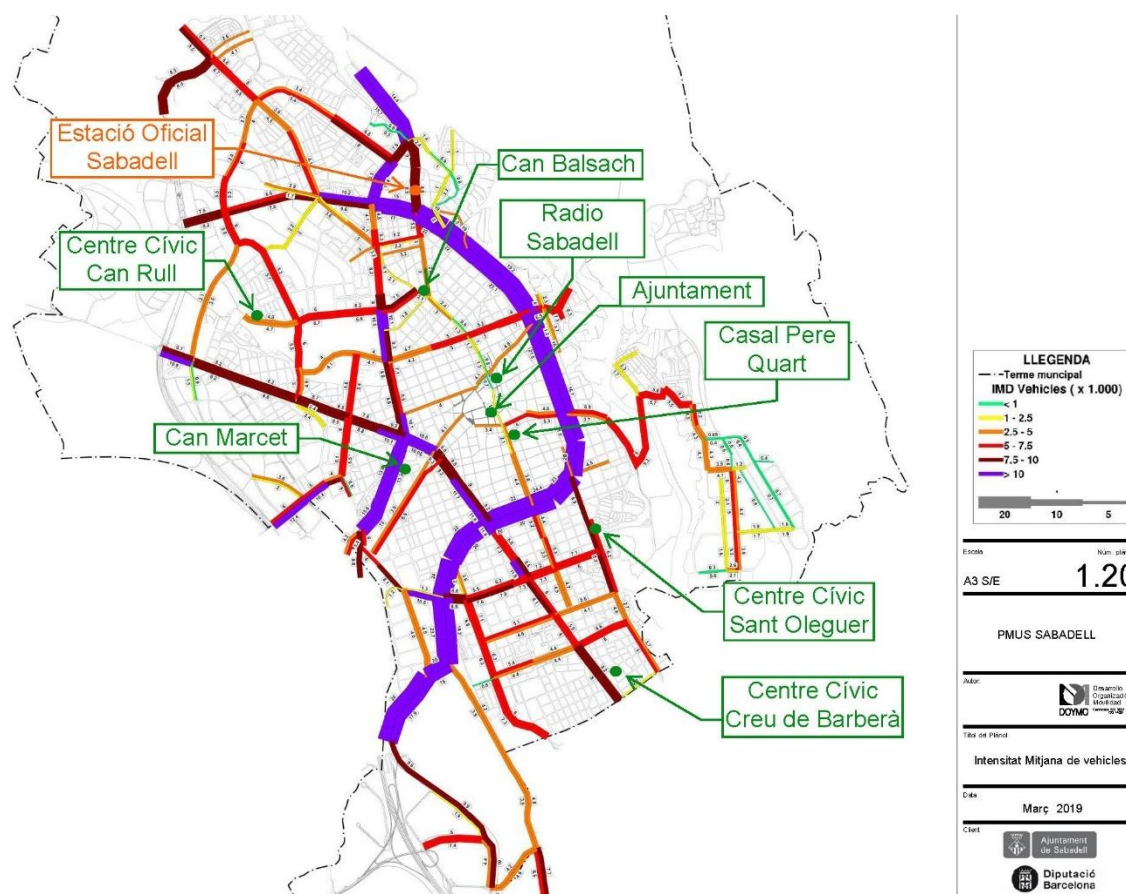
En la Tabla 8 se recogen los valores del coeficiente de correlación de Pearson (R), el sesgo medio (BIAS) y el error medio absoluto (MAE) obtenidos a partir de la comparación entre cada sensor low-cost y la estación oficial, considerando únicamente los periodos con registros simultáneos. Estos indicadores permiten caracterizar la coherencia temporal entre series, y cuantificar la magnitud y el signo de las diferencias observadas entre los sensores low-cost y la estación oficial.

Tabla 8 - Indicadores de comparación entre sensores low-cost de NO₂ y la estación oficial en Sabadell

Sensor	R Pearson	Sesgo medio (Bias) (µg/m³)	MAE (µg/m³)	Observaciones
Centre Cívic Creu de Barberà	0,799	3,91	7,22	Buena coherencia temporal. Diferencias positivas de baja magnitud.
Can Balsach	0,882	1,51	5,54	Muy buena coherencia temporal. Diferencias reducidas y baja magnitud de las discrepancias.
Can Marcet	0,859	4,3	7,44	Muy buena coherencia temporal. Diferencias positivas de magnitud moderada.
Centre Cívic Sant Oleguer	0,685	-3,65	7,45	Coherencia temporal moderada. Diferencias negativas de baja magnitud.
Radio Sabadell	0,692	-6,80	7,98	Coherencia temporal moderada – alta. Diferencias negativas de magnitud intermedia.
Centre Cívic Can Rull	0,393	-10,63	12,84	Baja coherencia temporal. Diferencias negativas y elevada magnitud de las discrepancias.
Casal Pere Quart	0,707	-11,04	11,33	Buena coherencia temporal con la estación oficial. Diferencias sistemáticas negativas y elevada magnitud de las discrepancias.
Ajuntament	0,586	-11,29	12,87	Coherencia temporal moderada. Diferencias negativas persistentes y discrepancias de elevada magnitud.

Con el fin de contextualizar espacialmente los puntos de medida, la Figura 8 muestra la localización de los sensores low-cost y la estación oficial en relación con la intensidad media diaria de tráfico en Sabadell.

Figura 8 - Localización de sensores low-cost de NO₂ y la estación oficial en relación con la intensidad media diaria de tráfico en Sabadell



Fuente: (Ajuntament de Sabadell, 2023)

Se muestra la localización de los sensores low-cost y de la estación oficial sobre un mapa de intensidad media diaria (IMD) que representa el número medio de vehículos que circulan por un tramo de una vía en un día en Sabadell. La red viaria se representa mediante distintos colores que indican rangos crecientes de volumen de tráfico, desde vías con baja intensidad (colores claros) hasta vías con elevada carga circulatoria (colores más oscuros).

La comparación entre los sensores low-cost y la estación oficial muestra que el comportamiento de estos dispositivos depende tanto del tipo de tecnología como de su ubicación. Los equipos de referencia MCV presentan valores más estables y concentraciones generalmente superiores, mientras que los sensores Kunak AIR Pro muestran una mayor dispersión y diferencias sistemáticas respecto a la estación oficial, reflejadas en los valores de sesgo medio y error absoluto.

Los valores de coeficiente de correlación de Pearson (R) indican que, a pesar de estas diferencias tecnológicas, varios sensores low-cost reproducen adecuadamente la variabilidad temporal de NO₂ registrada por la estación oficial. En particular, sensores como Can Balsach, Can Marcet y Centre Cívic Creu de Barberà presentan valores elevados de correlación ($R > 0,8$), lo que indica una buena capacidad para seguir las fluctuaciones temporales del contaminante.

Este comportamiento resulta compatible con su localización en entornos urbanos con patrones de movilidad similares a los de la estación oficial, tal y como se muestra en la Figura 8.

En contraste, otros sensores, Centre Civic Can Rull, muestran una correlación inferior ($R \approx 0,39$), lo que sugiere una menor representatividad temporal, posiblemente asociada a condiciones locales específicas donde tiene una influencia directa de tráfico menor. Estas diferencias ponen en manifiesto que, aun tratándose de dispositivos basados en la misma tecnología, el comportamiento registrado no es homogéneo entre ubicaciones. La información espacial mostrada en la Figura 8 permite contextualizar los resultados y evidencia que los sensores se ubican en entornos urbanos con características de movilidad diferentes.

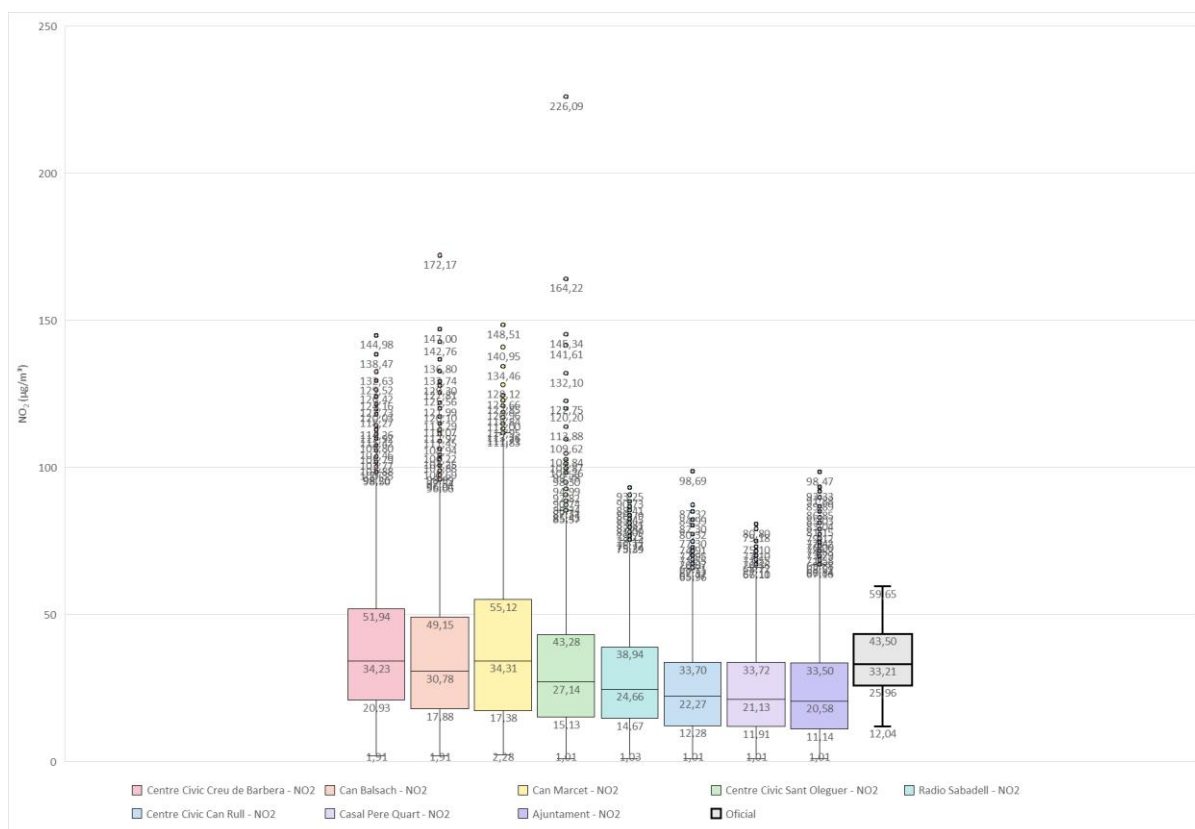
La Figura 8 pone en manifiesto que los puntos de medida se sitúan en entornos con características de movilidad diversas, lo que implica exposiciones distintas al tráfico rodado. Esta heterogeneidad espacial resulta relevante para la interpretación de los indicadores de comparación presentados en la Tabla 8. En particular, los sensores que presentan mayores valores de coherencia temporal con la estación oficial tienden a estar ubicados en entornos viarios comparables, mientras que aquellos con ubicaciones en zonas de menor intensidad de tráfico muestran diferencias en los indicadores de sesgo y error.

En conjunto, los resultados indican que los sensores low-cost son capaces de capturar patrones temporales de NO_2 de forma consistente en determinados puntos de la ciudad y aportan información relevante a escala local. No obstante, las diferencias observadas respecto a la estación oficial ponen en manifiesto que presentan limitaciones en la estimación de concentraciones absolutas. Por ello, su uso resulta adecuado como herramienta complementaria para análisis espacial de la contaminación urbana, pero para evaluación de normativa los datos deben venir de estaciones oficiales.

5.4.3 Distribución de las concentraciones de NO_2 registradas por sensores low-cost y estación oficial en Sabadell (2023 – 2024)

En la Figura 9 se muestra la distribución de concentraciones de NO_2 registradas por la estación oficial (caja con marco resaltado) y por los sensores low-cost en Sabadell durante el periodo 2023 y 2024. Por una parte, la estación oficial muestra una distribución más concentrada, con una menor dispersión de los valores mientras que los sensores low-cost muestran una mayor variabilidad y la presencia de valores extremos más elevados.

Figura 9 - Distribución de las concentraciones de NO₂ registradas por sensores low-cost y estación oficial en Sabadell (2023 – 2024)



5.4.4 Distribución horaria de NO₂ por tipo de sensor en el periodo de invierno

En las Figuras 10 y 11 se muestra como varían las concentraciones de NO₂ a lo largo del día durante el invierno en los años (2023 – 2024). Se observa que las concentraciones tienden a ser más elevadas en horas de la mañana y durante la tarde. En el caso de los sensores MCV, se observa que los datos presentan mayor dispersión y picos elevados durante las franjas horarias lo que indica la presencia de episodios puntuales de altas concentraciones.

Dos de los sensores de referencia MCV (Can Balsach y Can Marçet) se encuentran ubicados en zonas asociadas a elevada intensidad media diaria de tráfico, tal como se observa en la Figura 8. Esta localización puede contribuir a la aparición de valores elevados y mayor variabilidad horaria en invierno, mientras que Centre Cívic Creu de Barberà, aunque se clasifica como tráfico, está en una zona menos expuesta. Por parte de los sensores KUNAK Air Pro abarcan entornos diversos, desde zonas de tráfico intenso hasta un punto representativo de fondo urbano (Ajuntament), lo que explica que no todos registren los mismos niveles de NO₂ y su comportamiento depende en gran medida del entorno donde se ubican.

Figura 10 - Variabilidad horaria de NO₂ en periodo invernal por sensores MCV

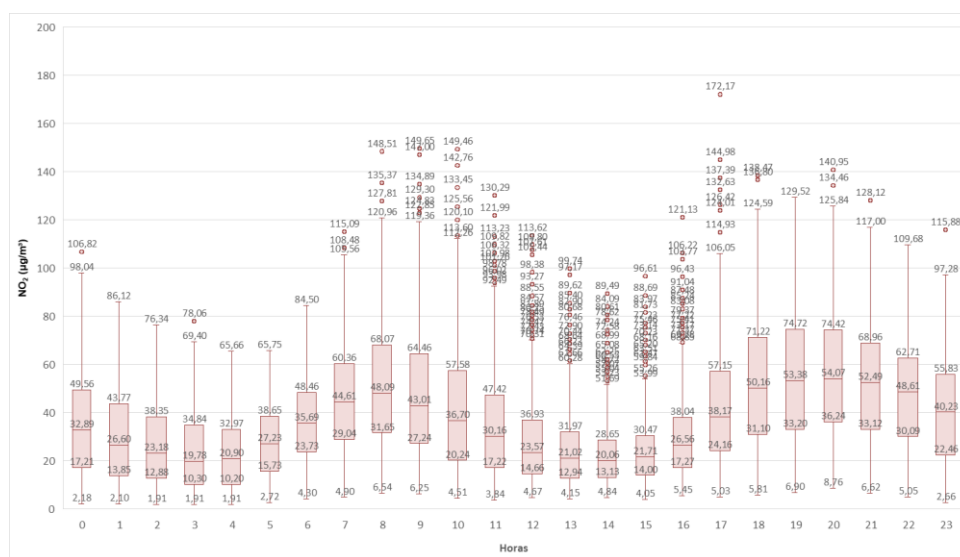
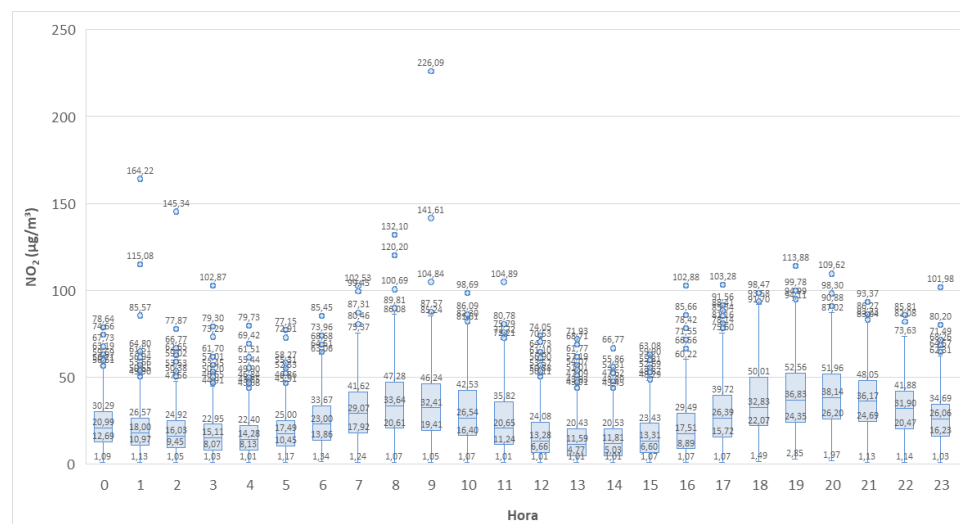


Figura 11 - Variabilidad horaria de NO₂ en periodo invernal por sensores KUNAK Air Pro



Los episodios recogidos en la Tabla 9 corresponden a incrementos horarios puntuales de las concentraciones de NO₂ con valores significativamente superiores a los niveles habituales. Estos registros no se interpretan como representativos de la exposición media, sino como situaciones concretas de corta duración y que aparecen de forma aislada en determinadas horas.

No obstante, el hecho de que estos valores pico se repitan en distintos sensores en varios días y franjas horarias similares, en especial en periodos con mayor actividad urbana, sugiere que no se trata de valores completamente aleatorios. La relación entre estos valores picos y las condiciones meteorológicas se aborda con más detalle en el apartado siguiente.

Tabla 9 - Episodios representativos de concentraciones elevadas de NO₂ en sensores de tráfico de Sabadell

Sensor	Tipo de equipo	Tipo de localización	Fecha y hora	NO ₂ (µg/m ³)
Centre Cívic Sant Oleguer	Sensor electrónico	Tráfico	16/12/2023 9:00	226,09
Can Balsach	Equipo de referencia	Tráfico	25/01/2024 17:00	172,17
Centre Cívic Sant Oleguer	Sensor electrónico	Tráfico	19/12/2023 1:00	164,22
Can Marcet	Equipo de referencia	Tráfico	05/02/2024 9:00	149,65
Can Marcet	Equipo de referencia	Tráfico	05/02/2024 10:00	149,46
Can Marcet	Equipo de referencia	Tráfico	06/02/2024 8:00	148,51
Can Balsach	Equipo de referencia	Tráfico	05/02/2024 9:00	147
Centre Cívic Sant Oleguer	Sensor electrónico	Tráfico	28/12/2023 2:00	145,34
Centre Cívic Creu de Barberà	Equipo de referencia	Tráfico	25/01/2024 17:00	144,98
Can Balsach	Equipo de referencia	Tráfico	05/02/2024 10:00	142,76
Centre Cívic Sant Oleguer	Sensor electrónico	Tráfico	24/01/2024 9:00	141,61
Can Marcet	Equipo de referencia	Tráfico	19/02/2024 20:00	140,95
Centre Cívic Creu de Barberà	Equipo de referencia	Tráfico	05/02/2024 19:00	129,52

5.4.5 Relación entre concentraciones de NO₂ y variables meteorológicas durante el periodo de estudio.

Con el fin de contextualizar los picos de concentraciones de NO₂ observados anteriormente (Tabla 9) durante el periodo de invierno, se analizaron las condiciones meteorológicas a partir de los datos de la estación Sabadell – Parc Agrari, descritas en la Tabla 10 a continuación:

Tabla 10 - Variables meteorológicas mensuales registradas en la estación de Sabadell - Parc Agrari (enero y febrero 2023 y 2024)

Variable	Unidad	ene-23	feb-23	ene-24	feb-24
Precipitación mensual	mm	2,3	46,9	25,1	17,8
Velocidad media del viento	m/s	2,2	1,8	1,8	2,1
Dirección dominante del viento	–	W	NW	W	W
Humedad relativa media	%	69	72	78	70
Presión atmosférica media	hPa	988,7	993,6	990	986,2
Temperatura media mensual	°C	6,8	7,6	9,1	11,2
Temperatura mínima media	°C	1,3	1,8	3,9	5,3
Temperatura máxima media	°C	13,1	14,6	14,8	18
N.º de días de helada	días	11	7	3	0

Fuente: (Servei Meteorològic de Catalunya, 2023, 2024)

Diversos estudios han identificado que las velocidades del viento inferiores a 1 m/s favorecen a la acumulación del NO₂ debido a la limitada dispersión atmosférica. También, las temperaturas bajas que son típicas en otoño e invierno reducen la mezcla vertical y la fotodegradación de NO₂ favoreciendo su acumulación. En cuanto a la humedad relativa, valores moderados (≈30–80 %) pueden coexistir con concentraciones elevadas de NO₂, mientras que periodos de lluvia intensa reducen sus niveles al limpiar el aire (Falocchi et al., 2021; Gao et al., 2025).

En el caso de Sabadell, aunque las velocidades medias mensuales registran valores por encima de este umbral (entre 1,8 y 2,2 m/s), estos valores siguen indicando unas condiciones de viento débil, compatibles con situaciones de estabilidad atmosférica y acumulación de contaminantes junto con temperaturas y precipitaciones invernales relativamente bajas.

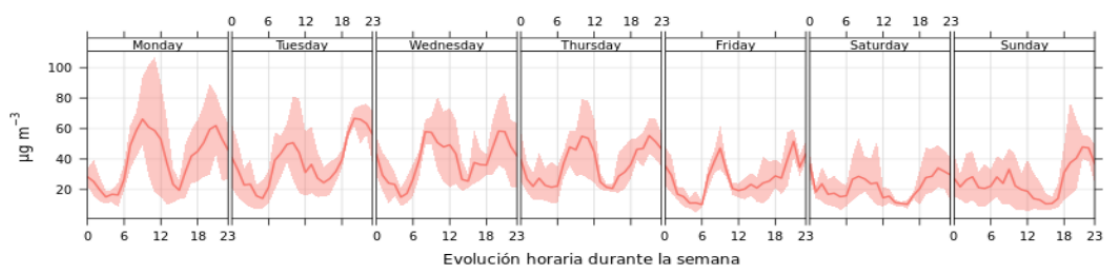
Otro factor meteorológico que afecta al NO₂ son las inversiones térmicas, ya que (Wallace & Kanaroglou, 2009) observaron incrementos del 49% en NO₂ durante episodios de inversión nocturna y del 11% durante inversiones diurnas, evidenciando el papel clave de la estabilidad atmosférica en la acumulación del NO₂. En este contexto, el incremento nocturno observado en las Figuras 10 y 11 puede interpretarse como resultado de la disminución de la altura de una capa límite atmosférica y condiciones más estables y la ausencia de procesos fotoquímicos de degradación, lo que favorece su acumulación.

El análisis de los registros horarios permitió identificar episodios de concentraciones elevadas de NO₂ en sensores ubicados en entornos de tráfico en Sabadell, especialmente durante los meses de invierno. Entre ellos, el sensor de Can Balsach mostró varios episodios representativos, por lo que fue seleccionado como caso de estudio para un análisis más detallado.

Con el fin de ilustrar los episodios altos de NO₂ observados en los sensores de tráfico, se analizó el informe mensual correspondiente al sensor Can Balsach para febrero de 2024 (4esfera, 2024). La Figura 12 muestra la evolución horaria media de NO₂ a lo largo de la semana, donde se identifican picos recurrentes en las franjas de la mañana y la tarde durante los días laborables.

Este patrón es coherente con los resultados obtenidos en el análisis principal, en que se observa una mayor variabilidad y la presencia de máximos horarios en periodos asociados al incremento de tráfico por la actividad diaria (4esfera, 2024).

Figura 12 -Perfil horario semanal de NO₂ en el sensor Can Balsach durante febrero de 2024 (Extraído del informe de Calidad Aire Sabadell – junio 2024)



Fuente: (4Esfera, 2024)

5.5 Potencial de los sensores low-cost y ciencia ciudadana

Varios estudios coinciden en que los sensores low-cost presentan un elevado potencial como herramienta complementaria a las redes oficiales de calidad del aire, especialmente porque permite disponer de un mayor número de puntos de medida dentro de la ciudad. Aunque este tipo de sensores presentan limitaciones en cuanto a su precisión de los valores absolutos y su estabilidad a largo plazo, la literatura muestra que son capaces de reproducir razonablemente bien la evolución temporal de contaminantes como el NO₂ cuando se comparan con equipos de referencia, en especial cuando se aplican correctamente los procesos de calibración (Castell et al., 2017; Liu et al., 2020).

Estudios comparativos realizados en distintas ciudades indican que el rendimiento de los sensores low-cost no es uniforme, y varía significativamente entre ciudades y localizaciones, incluso cuando se utilizan sensores del mismo tipo lo que presenta en ocasiones errores en las concentraciones absolutas. Sin embargo, presentan una buena capacidad para reproducir la variabilidad temporal de los contaminantes, lo que refuerza la idea de que, aunque tiene una buena correlación con estaciones de referencia no implica necesariamente exactitud en sus mediciones y que estos dispositivos deben entenderse como herramienta complementaria dentro de la monitorización (Hasan, 2023).

El coste económico es una de las principales diferencias entre las estaciones oficiales y los sensores low-cost. Mientras que los equipos de referencia presentan costes elevados tanto en adquisición como en mantenimiento donde alcanzan costes del orden de 10.000 a más de 50.000€, en cambio, los sensores low-cost se caracterizan por un precio bastante bajo entre 100 y 2.500€, lo que permite su despliegue en redes densas y con alta resolución espacial. No obstante, se señala que el bajo coste del hardware no elimina la necesidad de calibración, mantenimiento y gestión de datos, aspectos que deben considerarse en el coste del sistema. (Karagulian et al., 2019; Ródenas García et al., 2022).

Existe un gran potencial de la ciencia ciudadana como herramienta complementaria en la monitorización de la calidad del aire, especialmente apoyado con sensores low-cost. Este enfoque permite aumentar la resolución espacial de las mediciones y captar variaciones locales que no siempre pueden hacer las estaciones oficiales. Estudios demuestran que cuando estos proyectos están correctamente diseñados y cuentan con la metodología de validación adecuada, los datos que se obtienen por ciudadanos que los usan puede ser completamente válidos para el análisis ambiental y la identificación de patrones de contaminación urbana (Mahajan et al., 2020; Rebeiro-Hargrave et al., 2021).

Además de tener un valor técnico, la ciencia ciudadana desempeña un papel relevante en el aumento de la conciencia ambiental y la implicación social. La participación activa de la población aumenta la comprensión del problema de contaminación atmosférica y favorece cambios de actitud y comportamiento entre las personas. En este sentido, los sensores low-cost no actúan únicamente como herramienta de medición complementaria, sino también como instrumentos educativos y de empoderamiento ciudadano, reforzando la conexión entre conocimiento científico y la sociedad (Mahajan et al., 2020b).

6 Conclusiones

- El análisis comparativo con otros municipios del entorno del Vallès Occidental muestra que Sabadell presenta concentraciones y patrones temporales de NO₂ similares a los del resto del ámbito de estudio. Este resultado indica que el comportamiento del NO₂ en Sabadell no responde a dinámicas locales aisladas, sino que se enmarca en un contexto territorial común, compartido por otras ciudades estudiadas del Vallés.
- Aunque las concentraciones medias anuales de NO₂ cumplen actualmente con los valores límites legales vigentes, el análisis de superaciones del valor guía diario recomendado por la OMS (25 µg/m³) muestra un escenario distinto desde el punto de vista sanitario. En Sabadell, entre aproximadamente el 50% y el 75% de los días del año presentan concentraciones superiores a dicho valor y además estos se concentran en la estación de invierno. Esto evidencia la exposición frecuente de la población a niveles elevados de NO₂. En comparación con los otros municipios del Valles Occidental, Sabadell se sitúa en un rango intermedio-alto de superación de este valor guía diario.
- Los resultados muestran que los sensores low-cost son capaces de reproducir de forma coherente la evolución temporal del NO₂ en determinados puntos de la ciudad, aunque sin pretender ser equivalentes a las estaciones oficiales. En este sentido, el sensor de Can Balsach destaca como un caso representativo, al presentar una alta coherencia temporal con la estación de referencia ($R \approx 0,9$) y errores moderados en las concentraciones estimadas (MAE del orden de 5–6 µg/m³).

Este buen comportamiento se explica por la similitud del entorno urbano y la influencia del tráfico en ambas localizaciones. No obstante, el principal valor de estos sensores no reside en sustituir a las estaciones oficiales, sino en permitir analizar el comportamiento local y la variabilidad espacial del NO₂ en zonas donde la red oficial no alcanza el mismo nivel de detalle.
- A partir de los resultados obtenidos, se observa que la meteorología influye de forma clara en los niveles de NO₂ registrados en el entorno urbano, principalmente a través de las condiciones que favorecen o dificultan su dispersión. Factores como la velocidad del viento y la estabilidad atmosférica resultan especialmente relevantes, ya que situaciones de viento débil y atmósfera estable tienden a favorecer la acumulación del contaminante, mientras que una mayor ventilación contribuye a reducir las concentraciones observadas. En este sentido, la meteorología no determina las emisiones de NO₂, pero sí condiciona de manera significativa su impacto sobre la calidad del aire.
- El reducido coste de adquisición e instalación de los sensores low-cost, en comparación con las estaciones oficiales de referencia, facilita el despliegue de redes de monitorización y favorece al desarrollo de iniciativas de ciencia ciudadana, contribuyendo tanto a la mejora del conocimiento local de la calidad del aire como a la sensibilización y participación activa de la población en la gestión ambiental.

7 Bibliografia

- 4Esfera. (2024). *Auditoria anual de la red municipal de monitorización ambiental de Sabadell*.
https://web.sabadell.cat/images/Aire/Auditoria_semestral_Gen-Juny_2024_Sabadell_compressed.pdf
- Ajuntament de Sabadell. (2023). *Pla de Mobilitat Urbana Sostenible de Sabadell*.
https://web.sabadell.cat/images/DOCUMENT_I__MEM%C3%92RIA_.pdf
- Alberto Bernabeo, R. (2019). Health and Environmental Impacts of Nox: An Ultra- Low Level of Nox (Oxides of Nitrogen) Achievable with A New Technology. *Global Journal of Engineering Sciences*, 2(3). <https://doi.org/10.33552/gjes.2019.02.000540>
- 4Esfera. (2024). *Can Balsach, Calidad Aire Sabadell-Febrero 2024*.
<https://web.sabadell.cat/xarxasensors>
- Bañuelos-Gimeno, J., Sobrino, N., & Arce-Ruiz, R. M. (2023). Effects of Mobility Restrictions on Air Pollution in the Madrid Region during the COVID-19 Pandemic and Post-Pandemic Periods. *Sustainability (Switzerland)*, 15(17). <https://doi.org/10.3390/su151712702>
- Casquero-Vera, J. A., Lyamani, H., Titos, G., Borrás, E., Olmo, F. J., & Alados-Arboledas, L. (2019). Impact of primary NO₂ emissions at different urban sites exceeding the European NO₂ standard limit. *Science of the Total Environment*, 646, 1117–1125.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.360>
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Departament de Territori, H. i T. E. D. G. de C. C. i Q. A. (2024). *La qualitat de l'aire a Catalunya Avaluació NO₂ i NO_x - 2024*.
https://mediambient.gencat.cat/web/.content/home/ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laيرة/avaluacio/qa_avaluacio_balancos_informes/La-qualitat-de-laيرة-a-Catalunya-2024-NO2.pdf
- Doadrio Villarejo, A. L. (n.d.). LOS ÓXIDOS DE NITRÓGENO Y SU IMPORTANCIA EN LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA NITROGEN OXIDES AND THEIR ROLE IN AIR POLLUTION. In *Doadrio Villarejo An. Real Acad. Farm* (Vol. 88). www.analesranf.com
- Falocchi, M., Zardi, D., & Giovannini, L. (2021). Meteorological normalization of NO₂ concentrations in the Province of Bolzano (Italian Alps). *Atmospheric Environment*, 246.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118048>
- Gao, X., An, C., Yan, Y., Ji, Y., Wei, W., Xue, L., Gao, R., Shang, F., Li, J., Tan, L., & Li, H. (2025). Impacts of NO₂ on Urban Air Quality and Causes of Its High Ambient Levels: Insights from a Relatively Long-Term Data Analysis in a Typical Petrochemical City in the Bohai Bay Region, China. *Toxics*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/toxics13030208>
- Generalitat de Catalunya. (n.d.). *Xarxa de Vigilància i Previsió de la Contaminació Atmosfèrica (XVPCA)*. Retrieved January 17, 2026, from https://mediambient.gencat.cat/es/05_ambits_dactuacio/atmosfera/qualitat_de_laيرة/vols-saber-que-respires/descarrega-de-dades/descarrega-dades-automatiques/index.html

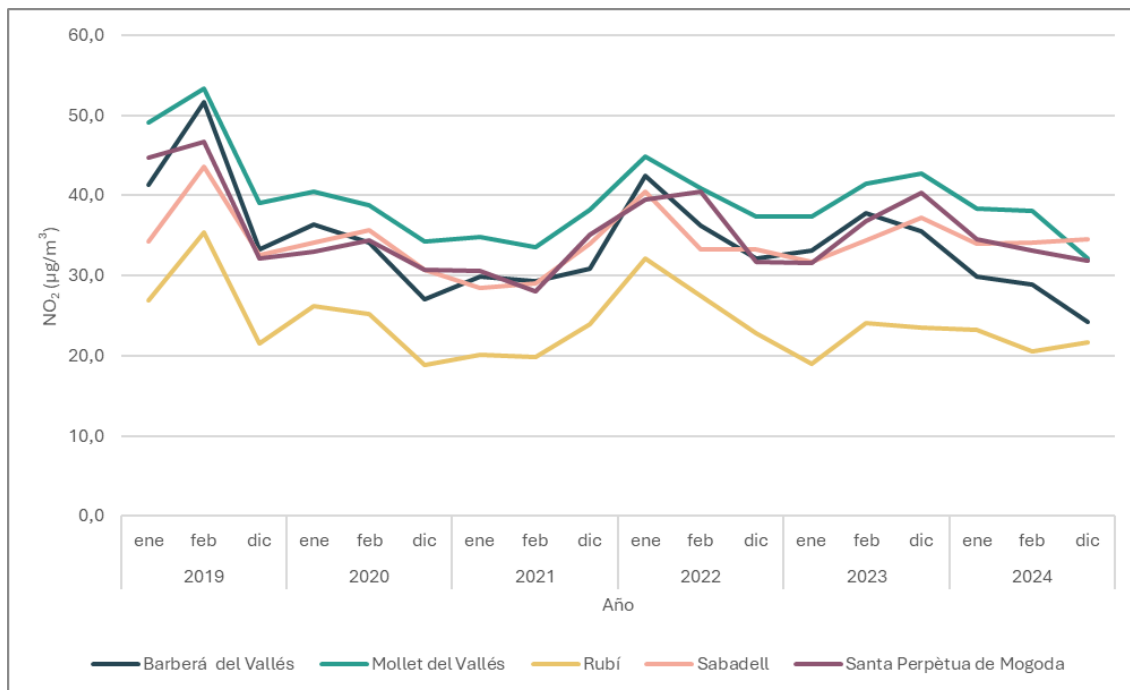
- Hasan, H. (2023). *Performance Comparison of Low-Cost Sensors Across Six Cities of Continental United States*. <http://library.ucf.edu>
- Institut d'Estadística de Catalunya. (2025). *El minicipi en xifres: Sabadell (Vallès Occidental)*. INDESCAT. <https://www.idescat.cat/emex/?id=081878>
- World Health Organization. (2021). *WHO Global air quality guidelines*.
- Karagulian, F., Barbiere, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. In *Atmosphere* (Vol. 10, Issue 9). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/atmos10090506>
- KUNAK Technologies. (n.d.). *KUNAK AIR Pro – Technical datasheet*. Retrieved January 17, 2026, from https://kunakair.com/doc/External/Kunak_AIR_Datasheet_ES.pdf
- Lemus-Canovas, M. (2021). Barcelona intense urban activity greatly limited the role of the atmosphere in driving no2 concentration in 2018. *Environmental Research Communications*, 3(10). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac2fbb>
- Linares, C., Falcón, I., Ortiz, C., & Díaz, J. (2018). An approach estimating the short-term effect of NO2 on daily mortality in Spanish cities. *Environment International*, 116, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.002>
- Liu, X., Jayaratne, R., Thai, P., Kuhn, T., Zing, I., Christensen, B., Lamont, R., Dunbabin, M., Zhu, S., Gao, J., Wainwright, D., Neale, D., Kan, R., Kirkwood, J., & Morawska, L. (2020). Low-cost sensors as an alternative for long-term air quality monitoring. *Environmental Research*, 185. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109438>
- Mahajan, S., Kumar, P., Pinto, J. A., Riccetti, A., Schaaf, K., Camprodon, G., Smári, V., Passani, A., & Forino, G. (2020a). A citizen science approach for enhancing public understanding of air pollution. *Sustainable Cities and Society*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101800>
- Mahajan, S., Kumar, P., Pinto, J. A., Riccetti, A., Schaaf, K., Camprodon, G., Smári, V., Passani, A., & Forino, G. (2020b). A citizen science approach for enhancing public understanding of air pollution. *Sustainable Cities and Society*, 52. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101800>
- Martilli, A., Sanchez, B., Santiago, J. L., Rasilla, D., Pappaccogli, G., Allende, F., Martin, F., Roman-Cascón, C., Yagüe, C., & Fernandez, F. (n.d.). *Persistent Wintertime Thermal Inversion in the City. The case of Madrid. Part II. Dispersion*.
- MCV. (n.d.). *MCV - Analizador de aire ambiente para NOx*. Retrieved January 23, 2026, from <https://mcvsa.com/es/productes/analizador-de-aire-ambiente-para-nox/>
- Paraschiv, S., & Paraschiv, L. S. (2019). Analysis of traffic and industrial source contributions to ambient air pollution with nitrogen dioxide in two urban areas in Romania. *Energy Procedia*, 157, 1553–1560. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.321>
- Pültz, J., Thürkow, M., Banzhaf, S., & Schaap, M. (2025). Nitrogen Dioxide Source Attribution for Urban and Regional Background Locations Across Germany. *Atmosphere*, 16(3). <https://doi.org/10.3390/atmos16030312>
- Querol, X., Massagué, J., Alastuey, A., Moreno, T., Gangoiti, G., Mantilla, E., Duéguéz, J. J., Escudero, M., Monfort, E., Pérez García-Pando, C., Petetin, H., Jorba, O., Vázquez, V., de

- la Rosa, J., Campos, A., Muñoz, M., Monge, S., Hervás, M., Javato, R., & Cornide, M. J. (2021). Lessons from the COVID-19 air pollution decrease in Spain: Now what? *Science of the Total Environment*, 779. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146380>
- Rebeiro-Hargrave, A., Fung, P. L., Varjonen, S., Huertas, A., Sillanpää, S., Luoma, K., Hussein, T., Petäjä, T., Timonen, H., Limo, J., Nousiainen, V., & Tarkoma, S. (2021). City Wide Participatory Sensing of Air Quality. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.773778>
- Ródenas García, M., Spinazzé, A., Branco, P. T. B. S., Borghi, F., Villena, G., Cattaneo, A., Di Gilio, A., Mihucz, V. G., Gómez Álvarez, E., Lopes, S. I., Bergmans, B., Orłowski, C., Karatzas, K., Marques, G., Saffell, J., & Sousa, S. I. V. (2022). Review of low-cost sensors for indoor air quality: Features and applications. In *Applied Spectroscopy Reviews* (Vol. 57, Issues 9–10, pp. 747–779). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/05704928.2022.2085734>
- Schober, P., & Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763–1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>
- Servei Meteorològic de Catalunya. (2023). *Taules de Dades de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques i de la Xarxa d'Observadors Meteorològics*. https://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2024/06/28102930/EMA-EM_taulas2023.pdf
- Servei Meteorològic de Catalunya. (2024). *Taules de Dades de la Xarxa d'Estacions Meteorològiques Automàtiques i de la Xarxa d'Observadors Meteorològics*. https://static-m.meteo.cat/wordpressweb/wp-content/uploads/2025/06/20112112/EMA-EM_taulas2024.pdf
- Wallace, J., & Kanaroglou, P. (2009). The effect of temperature inversions on ground-level nitrogen dioxide (NO₂) and fine particulate matter (PM_{2.5}) using temperature profiles from the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS). *Science of the Total Environment*, 407(18), 5085–5095. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.050>

8 Anexos

En la Figura 13 se muestra la variabilidad de las concentraciones medias de NO₂ durante el periodo invernal en los municipios analizados para el periodo 2019 – 2024.

Figura 13 - Variación mensual INVIERNO de NO₂



La Tabla 9 recoge las superaciones del valor diario de NO₂ (50 µg/m³) propuesto por la Directiva 2008//CE. En contraste con el valor guía de la OMS, las superaciones de este umbral son mucho menos frecuentes, con porcentajes bajos o incluso nulos en varios municipios y años.

Tabla 11 - Número y porcentaje de días que superan el valor diario de NO₂ (50 µg/m³) propuesto para la Directiva 2008/50/CE, por municipio y estación (2019-2024)

Municipio	2019			2020			2021			2022			2023			2024		
	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%	Total	Excede	%
Barberá del Vallés																		
Invierno	88	29	33%	91	11	12%	90	5	6%	87	9	10%	81	14	17%	91	2	2%
Otoño	90	3	3%	86	3	3%	89	0	0%	83	0	0%	90	0	0%	91	0	0%
Primavera	90	7	8%	89	2	2%	75	0	0%	91	1	1%	92	0	0%	91	0	0%
Verano	86	2	2%	80	0	0%	88	0	0%	86	0	0%	91	0	0%	92	0	0%
TOTAL	354	41	12%	346	16	5%	342	5	1%	347	10	3%	354	14	4%	365	2	1%
Mollet del Vallés																		
Invierno	90	40	44%	91	13	14%	86	4	5%	83	12	14%	85	18	21%	91	6	7%
Otoño	91	6	7%	91	1	1%	91	2	2%	65	0	0%	89	0	0%	91	0	0%
Primavera	91	13	14%	92	1	1%	87	0	0%	88	2	2%	91	1	1%	91	0	0%
Verano	91	2	2%	84	0	0%	91	0	0%	91	0	0%	92	0	0%	92	0	0%
TOTAL	363	61	17%	358	15	4%	355	6	2%	327	14	4%	357	19	5%	365	6	2%
Rubí																		
Invierno	82	1	1%	87	1	1%	88	0	0%	89	1	1%	89	0	0%	89	0	0%
Otoño	87	0	0%	89	0	0%	91	0	0%	84	0	0%	89	0	0%	90	0	0%
Primavera	86	0	0%	90	0	0%	75	0	0%	92	0	0%	72	0	0%	90	0	0%
Verano	92	0	0%	90	0	0%	92	0	0%	86	0	0%	91	0	0%	86	0	0%
TOTAL	347	1	0%	356	1	0%	346	0	0%	351	1	0%	341	0	0%	355	0	0%
Sabadell																		
Invierno	90	18	20%	90	6	7%	89	3	3%	90	8	9%	86	8	9%	91	8	9%
Otoño	91	10	11%	91	3	3%	90	0	0%	91	1	1%	91	0	0%	90	1	1%
Primavera	91	6	7%	90	1	1%	92	0	0%	89	1	1%	92	0	0%	92	1	1%
Verano	90	2	2%	91	0	0%	85	0	0%	92	0	0%	92	0	0%	92	0	0%
TOTAL	362	36	10%	362	10	3%	356	3	1%	362	10	3%	361	8	2%	365	10	3%
Santa Perpètua de Mogoda																		
Invierno	80	21	26%	91	5	5%	88	3	3%	89	11	12%	79	14	18%	91	2	2%
Otoño	90	1	1%	91	0	0%	89	0	0%	90	0	0%	90	0	0%	91	0	0%
Primavera	92	2	2%	91	0	0%	75	0	0%	90	2	2%	90	0	0%	74	0	0%
Verano	92	1	1%	92	0	0%	77	0	0%	92	0	0%	83	0	0%	69	0	0%
TOTAL	354	25	7%	365	5	1%	329	3	1%	361	13	4%	342	14	4%	325	2	1%

***Total:** número de días con datos válidos.

***Excede:** número de días con concentraciones diarias de NO₂ > 50

*%: porcentaje de días de superación respecto al total