



**Fundación CENTRO DE ESTUDIOS
AMBIENTALES DEL
MEDITERRÁNEO. (Fundación CEAM).**

**EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES DE
CONTAMINACIÓN POR NO₂ EN EL
ENTORNO DE LA CIUDAD DE
VALENCIA.**

**MEDIDAS EXPERIMENTALES CON
CAPTADORES PASIVOS.**

SÍNTESIS 2017-2021

***Fundación Centro de Estudios
Ambientales del Mediterráneo***

Preparado por : *Programa de Meteorología y Contaminación Atmosférica.*

Fecha : *05/07/2022*

Referencia : *MuestrosValenciaNO2/2022/a*

Versión 0.



EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN POR NO₂ EN EL ENTORNO DE LA CIUDAD DE VALENCIA. MEDIDAS EXPERIMENTALES CON CAPTADORES PASIVOS.

SÍNTESIS 2017-2021.

05 de julio de 2022

ÍNDICE DE CONTENIDOS.	<i>pgns</i>
INTRODUCCIÓN.	1
MATERIALES Y MÉTODOS	
Diseño experimental.	
RESULTADOS	
Entorno atmosférico	
Tráfico vehicular	
Tráfico portuario	
Red de vigilancia	
Muestreos dosimétricos	
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	



**Los trabajos presentados han sido realizados por el Área de Meteorología y
Contaminación Atmosférica del Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo.**



EVOLUCIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN POR NO₂ EN EL ENTORNO DE LA CIUDAD DE VALENCIA. MEDIDAS EXPERIMENTALES CON CAPTADORES PASIVOS.

SÍNTESIS 2017-2021.

València 05/07/2022 (V0)

INTRODUCCIÓN

Está bien establecida la relación entre la exposición a la contaminación atmosférica y el incremento de las enfermedades asociadas, con la consiguiente pérdida de años de vida saludable, con resultado de muerte en muchas ocasiones, pudiendo contabilizarse en millones de defunciones anuales en todo el mundo (contrastado por la OMS). Este tipo de dolencias relacionadas con la exposición a una mala calidad del aire está creciendo en todo el mundo, pese a una mejora general de los niveles ambientales en el ámbito de los países desarrollados, lo que también parece estar relacionado en gran medida con el envejecimiento de la población y cambios en los estilos de vida.

Uno de los cambios sociales más representativos procede del hecho de la rápida urbanización que ha experimentado la población mundial desde 1950, y que ya en 2007, por primera vez en la historia, la radicada en las ciudades superó a nivel mundial a la población rural, de manera que actualmente un mayor número de individuos viven en áreas urbanas que en áreas rústicas (en 2018, un total de 4200 millones de personas (55%) residían en asentamientos urbanos en comparación con 3400 millones que lo hacían en un medio rural).

Bajo el término de *contaminación urbana* (frente a la de carácter industrial) se incluirían situaciones de elevada contaminación en entornos habitados, con alta densidad de población, cuyas emisiones (caracterizadas por una compleja mezcla de especies químicas, algunas de ellas tóxicas) tendrían su origen principal en procesos de combustión, fuertemente imbricados en los hábitos de los propios residentes. Esto marcaría algunas de las grandes características de este tipo de problemas: entornos muy complejos, con una fuerte variabilidad espacial (alta anisotropía), que dan lugar a la existencia de elevados gradientes atmosféricos (de todo tipo: viento, temperatura, concentraciones, etc); focos difusos (tráfico, calefacciones, etc) y con patrones de comportamiento variables en el tiempo (ciclos diurnos y estacionales muy marcados).

Este tipo de entornos/situaciones presentan gran interés en varios aspectos:

- ✓ son propensas a la ocurrencia de altos niveles de concentración de contaminantes (principalmente primarios – especialmente óxidos de nitrógeno y partículas-), en ocasiones superando los límites normativos;
- ✓ precisamente por tratarse de áreas densamente pobladas, representan una de las causas más importante de la exposición de la población a niveles altos de contaminación (importancia en los estudios epidemiológicos);
- ✓ resultan complicados (y a la vez complejos) de diagnosticar debido a su propia naturaleza variable (en el espacio y el tiempo);
- ✓ como consecuencia, se muestran también complejos de modificar, interviniendo, además de los propios condicionantes técnicos, aspectos históricos, sociológicos y culturales (asentamientos, hábitos, necesidades, etc).

Las redes de vigilancia habituales proporcionan una primera evaluación de la calidad del aire en estos entornos que, si bien permite alertar de la existencia de una situación anómala de contaminación (p.e. superación de los umbrales permitidos en alguno de los puntos de medida),



resultan claramente insuficientes para su adecuado diagnóstico y gestión, en tanto que recogen solo parcialmente la rica estructura, la multifactorialidad y la casuística del problema.

Desde la perspectiva de la legislación medioambiental actual (concretada el RD 102/2011 relativa a la mejora de la calidad del aire), dos retos principales se plantean en este ámbito:

- desarrollar la capacidad de **diagnóstico de los problemas de contaminación en un entorno urbano** con la resolución requerida para una correcta comprensión, para lo cual se precisaría de la implementación de programas de mediciones experimentales con una mayor cobertura (que la estricta red automática), de acuerdo al alto grado de libertad del sistema atmosférico urbano;
- como paso siguiente al diagnóstico (en el estado en que se encuentre) y bajo una demanda legal efectiva (y en este momento urgente derivada del cumplimiento de los requisitos de la actual normativa), se plantea la necesidad de **desarrollar planes de actuación** tendentes a reducir los niveles de contaminación por debajo de los umbrales establecidos; en este sentido no solo se precisa caracterizar el alcance del problema ambiental (diagnóstico) sino entender las *relaciones causa-efecto* (tanto a nivel cualitativo como cuantitativo) a fin de poder diseñar actuaciones sobre aquellas (causas –emisiones-) que desencadenen consecuencias (reductoras) sobre estos (efectos –niveles de concentración-); en esta línea habría incluso una demanda propiamente de descripción de una **metodología de trabajo**.

La ciudad de Valencia, a orillas del río Turia, en la costa que delimita el centro del golfo de igual nombre, representa un ejemplo de gran conurbación, cuyo municipio se extiende sobre unas trece mil hectáreas. Con una población que ha experimentado un fuerte aumento con el inicio de siglo, sufre una caída tras la crisis del 2008, situándose en la actualidad con un censo en torno a los setecientos noventa mil habitantes, centro de un área metropolitana que sobrepasa el millón y medio. Representa el 15,9% de la población de la Comunidad Valenciana y es, por tamaño demográfico, la tercera ciudad de España.



Figura 01. Evolución del número de habitantes en el término municipal de Valencia (fuente INE).

Con un parque automovilístico de casi medio millón de unidades y una red viaria principal de unos trescientos kilómetros, constituiría el principal contribuidor a los niveles de contaminación atmosférica en el entramado urbano, donde las emisiones directas procedentes del ámbito doméstico (principalmente calefacciones) y de la actividad empresarial tendrían un impacto menor. Tampoco habría que olvidar la potencial incidencia del tráfico portuario que acoge cada año casi ocho mil buques de diversa naturaleza que acceden los diferentes muelles de sus instalaciones, con distintos tiempos de permanencia.



MATERIALES Y MÉTODOS

En este contexto normativo, y con relación a las peculiaridades/complejidades de la contaminación urbana, los captadores pasivos proporcionan una herramienta útil de trabajo, que complementaría ventajosamente la disponibilidad de una red de cabinas automáticas con medidas en continuo.

Los *dosímetros pasivos* consisten, generalmente, en un pequeño contenedor (habitualmente en forma de tubo, con una parte permeable -muchas veces aire-) con un extremo expuesto al ambiente y otro cerrado, en el que el gas presente en el ambiente es transportado por difusión molecular desde la parte abierta hasta la parte cerrada, en donde es absorbido por alguna sustancia captadora depositada previamente.

Estos elementos muestreadores presentan algunas claras *ventajas* ante otros métodos de medida activos o automáticos:

- no necesitan energía eléctrica ni ninguna clase de protección externa especial, por lo que pueden ser utilizados en localizaciones remotas, donde no pueden ser empleados otros métodos de medida;
- resultan en general fáciles de preparar, utilizar, almacenar y analizar;
- no precisan calibración en campo;
- proporcionan en general un procedimiento de medida económico, por lo que puede ser utilizado simultáneamente en varios emplazamientos, permitiendo una amplia cobertura espacial (en todo caso mucho mayor que los costosos equipos electrónicos).

Naturalmente, también presentan *inconvenientes* frente a otras técnicas de medida:

- no pueden utilizarse en cortos periodos de tiempo, proporcionando solo las concentraciones integradas (promedio) para el intervalo temporal de exposición;
- pueden ocurrir errores debidos a las fluctuaciones en las concentraciones del contaminante en la atmósfera y por variación de las condiciones meteorológicas;
- requieren análisis en laboratorio, por lo que se precisa una mínima infraestructura en este sentido;
- la colocación/recogida en campo exige un cierto despliegue de personal y de recursos móviles.

Por lo tanto, cabe resumir que la ventaja más relevante de la metodología pasiva es el bajo coste de la misma, que hace de ella un arma útil para la medida de contaminantes en diversos puntos simultáneamente, aportando la potencialidad de una elevada cobertura espacial, contando como mayor limitación el hecho de proporcionar valores integrados sobre periodos de tiempo relativamente largos, con la consiguiente penalización en la resolución temporal. En general las limitaciones/carencias que presentan los dosímetros vienen dadas por el mismo *proceso de difusión*, la *variabilidad de la concentración atmosférica*, las *interferencias químicas* o la *eficacia de fijación y extracción de la muestra*.

Se compilan aquí los resultados experimentales de una secuencia continuada de cinco años de muestreos con captadores pasivos en el entramado urbano de Valencia, inicialmente diseñados y ejecutados con el objetivo de caracterizar el estado de contaminación por dióxido de nitrógeno con una alta resolución espacial en el entorno de la ciudad de Valencia y su área de influencia.



Diseño experimental.

La red de mediciones dosimétricas que se ha venido manteniendo en todas las campañas experimentales cuenta con dos distribuciones de medidas, una de ellas a la que se refiere como *regular* o *semirregular*, y que se extiende sobre un rectángulo de aproximadamente 11x10 km, centrado en el núcleo urbano, y en la que se distribuyen un total de 97 puntos de medida (figura 02), asegurando uno de ellos por cada celda de 1x1 km (aquí dispuestos de manera aleatoria); y una segunda distribución, *periférica*, constituida por 8 puntos adicionales que conforman un arco en torno a la ciudad y que se sitúan en ambientes estrictamente rurales (no considerada en el análisis presente). A diferencia de estos últimos, los emplazamientos en la primera de las redes resultan bastante heterogéneos, incluyendo zonas con diferentes tasas de tráfico, distintos grados de urbanización, de densidad de población, etc. En todos los casos se ha asegurado que el microemplazamiento cumpla con una serie de requisitos mínimos que pudiesen sesgar las medidas, como son una buena ventilación, alejamiento de fuentes y emisiones directas, etc.

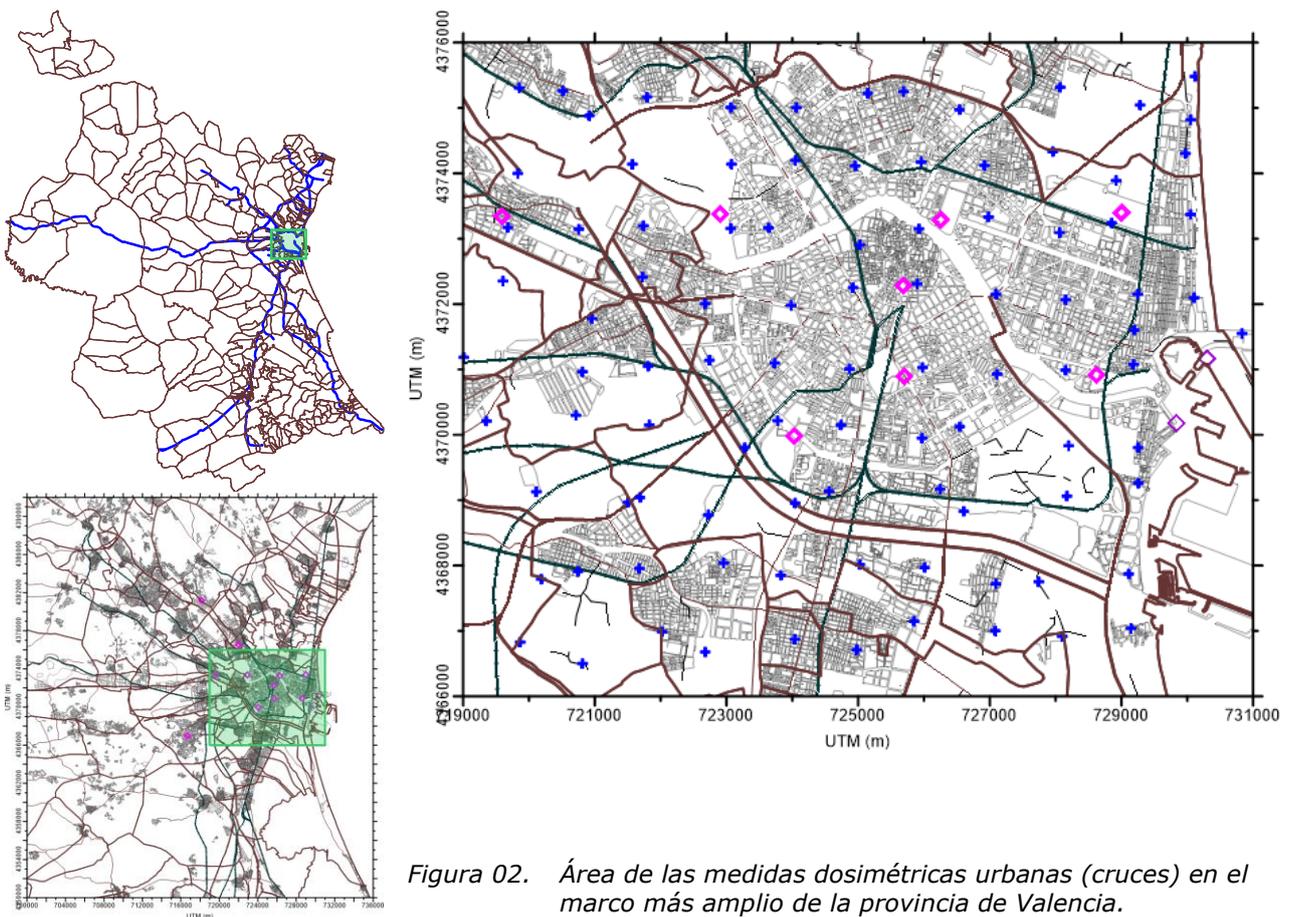


Figura 02. Área de las medidas dosimétricas urbanas (cruces) en el marco más amplio de la provincia de Valencia.

Es claro que las diferentes localizaciones vendrán afectadas por factores locales que condicionen fuertemente los niveles registrados, y cuya caracterización podría matizarse en un estudio de más detalle. Entre estos rasgos condicionante cabría diferenciar dos grandes tipos: los que afectarían al grado de ventilación del emplazamiento (anchura de la calle, altura de edificios próximos, presencia de espacios abiertos, alineación con los vientos predominantes, ...), y los derivados de la intensidad de las emisiones cercanas (proximidad a redes viarias, frecuencia y ocupación automovilística, densidad de población, tipología de vehículos, ...).



Dentro del ámbito espacial delimitado por la distribución de la red regular se sitúan ocho estaciones automáticas de la red valenciana de vigilancia y control de la contaminación atmosférica, y que son las que en conjunto se utilizarán como comparación con los promedios dosimétricos (*Pista de Silla, Avenida de Francia, Molí del Sol, Vivers, Bulevard Sud, Politènic, Centro y Quart de Poblet*). Adicionalmente se habrían incorporado otras dos cabinas ubicadas dentro del recinto portuario de la ciudad, inicialmente no disponibles (una de ellas de reciente instalación -2021-) por lo que no se han incorporado al tratamiento cuantitativo expuesto.

La gráfica siguiente compila la disponibilidad temporal de las campañas experimentales dosimétricas realizadas con una cobertura y metodologías similares, desde el año 2002. Salvo el año 2009, en que se realizaron con cierta profusión, las campañas se realizaron de manera dispersa y solo desde el 2017 se aseguró un muestreo estacional con cuatro mediciones anuales en periodos similares, cubriendo ya un total de cinco años completos (en el año 2020, fuertemente afectado por las consecuencias de las restricciones ante la pandemia del COVID19, se realizó un muestreo extra durante un tiempo de actividad social reducida, que no se ha incorporado en el presente análisis por considerar que los resultados están fuertemente sesgados por tales circunstancias).

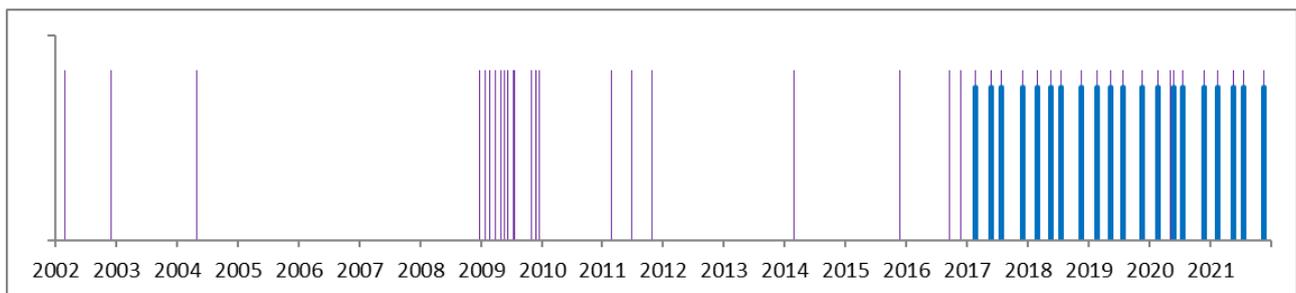


Figura 03. Disponibilidad de muestreos dosimétricos en el entorno urbano de la ciudad de Valencia y selección de los cinco años recientes, en los que se dispone de cuatro campañas en los mismos periodos estacionales, para los cálculos que se presentan.



RESULTADOS

Se muestran a continuación los resultados de las mediciones dosimétricas realizadas entre los años 2017 y 2021 sobre la red semirregular en la ventana más urbana.

Entorno atmosférico

Las mediciones dosimétricas que se analizan, obtenidas a lo largo de los cinco años recientes tienen una cobertura completa de cuatro muestreos individuales e independientes, distribuidos estacionalmente, aproximadamente en fechas muy similares. Con un tiempo de exposición de los captadores pasivos muy próximo a una semana en cada una de las campañas, los cuatro muestreos anuales representan solo un 7.7% del tiempo total de todo un año. A pesar de que los muestreos individuales se ubican en periodos ambientalmente bien diferenciados, no necesariamente recogen suficientemente toda la variabilidad aerológica del periodo completo que determina la capacidad dispersiva de la atmósfera, con el potencial sesgo de las concentraciones respecto a lo que podría ser el comportamiento normal.

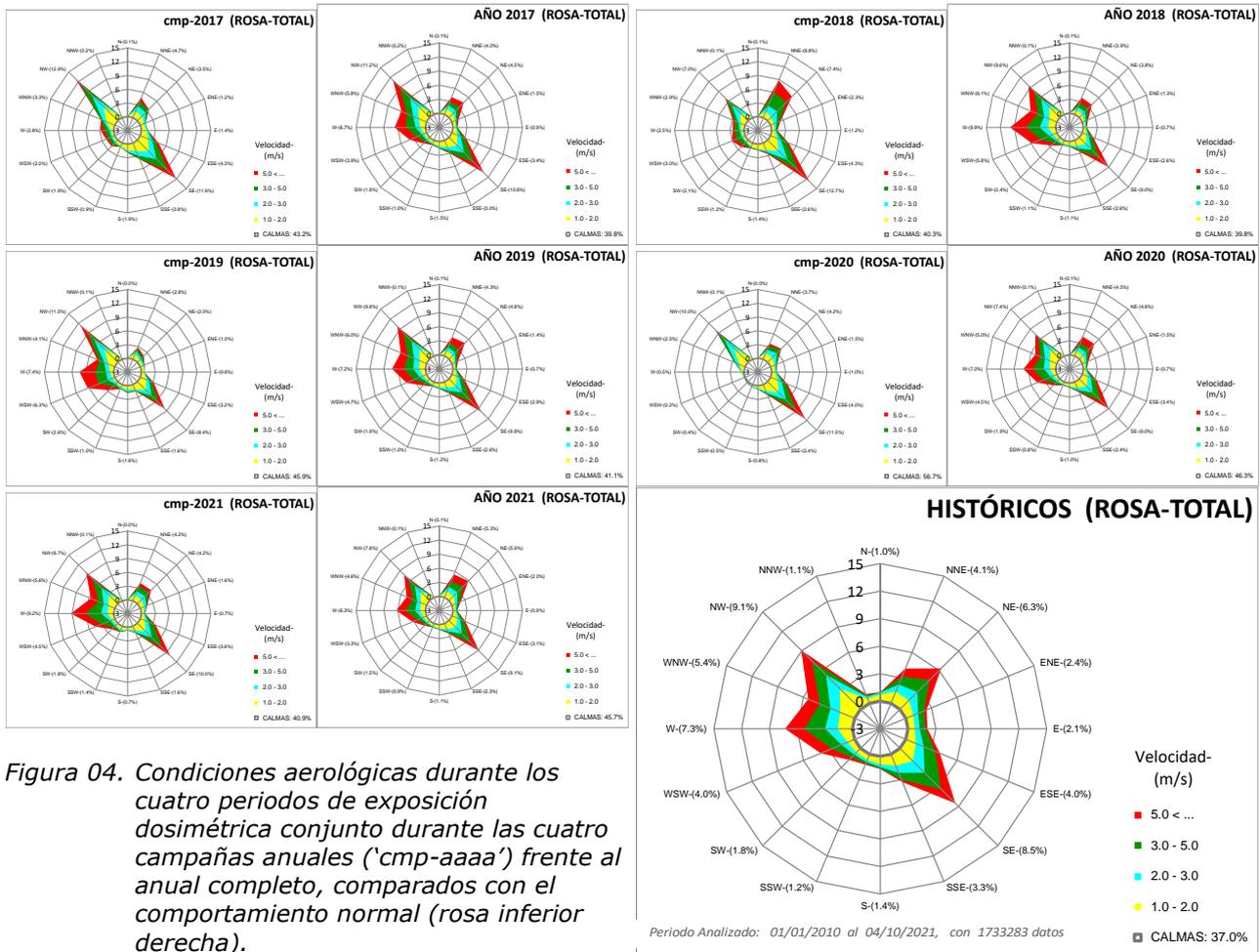


Figura 04. Condiciones aerológicas durante los cuatro periodos de exposición dosimétrica conjunto durante las cuatro campañas anuales ('cmp-aaaa') frente al anual completo, comparados con el comportamiento normal (rosa inferior derecha).

La dinámica atmosférica en el entorno de estudio viene determinada en gran parte del año, y especialmente en el periodo estival, por un régimen de circulaciones locales en superficie -brisas de mar- que, en términos generales, soplan del mar (preferentemente del sureste) durante el



día, con intensidades moderadas, y rolan al noroeste por la noche, con un flujo de tierra con intensidades bajas, jalonándose ambos periodos por transitorios de calmas o vientos muy débiles y variables. Los vientos más intensos corresponden a situaciones sinópticas bien definidas que en general se asocian a la entrada de frentes atlánticos (noroestes), los temporales de levante o la advección de aire continental bajo un régimen del primer cuadrante (norestes).

Las rosas de viento de la figura 04 reflejan, por parejas, la distribución porcentual de vientos durante el periodo estricto de exposición de los captadores, junto a la elaborada a partir de los registros del año completo (en tamaño grande se muestra la rosa climática que incorpora la serie de medidas 2010-2021). La distribución de vientos para cada uno de los años completos no discrepa mucho morfológicamente de la serie climática, siendo más sustanciales las diferencias en los periodos estrictos de exposición de los dosímetros por el sesgo que puede inducir una secuencia (~una semana) tan corta de medidas. En las estadísticas anuales (figura 05) los tres primeros resultaron algo más ventosos, frente a los dos últimos, con mayor frecuencia de calmas y vientos medios por debajo de los normales. En los diferentes muestreos (conjunto de cuatro semanas coincidentes con la exposición de los captadores pasivos) la variabilidad es mayor, debido también a que no todos los regímenes circulatorios están proporcionalmente representados. En general la intensidad de las velocidades es inferior a las de sus correspondientes años, lo que destaca en las campañas del 2017 y 2020. En ambas la componente sinóptica del oeste/noroeste, caracterizada por vientos más intensos, está prácticamente ausente, con una elevada proporción del régimen de brisas del segundo cuadrante, preferentemente diurno y muy moderado. Especialmente las campañas realizadas durante el 2020 reflejan una elevada proporción de calmas y vientos flojos, con promedios muy inferiores al resto de los casos.

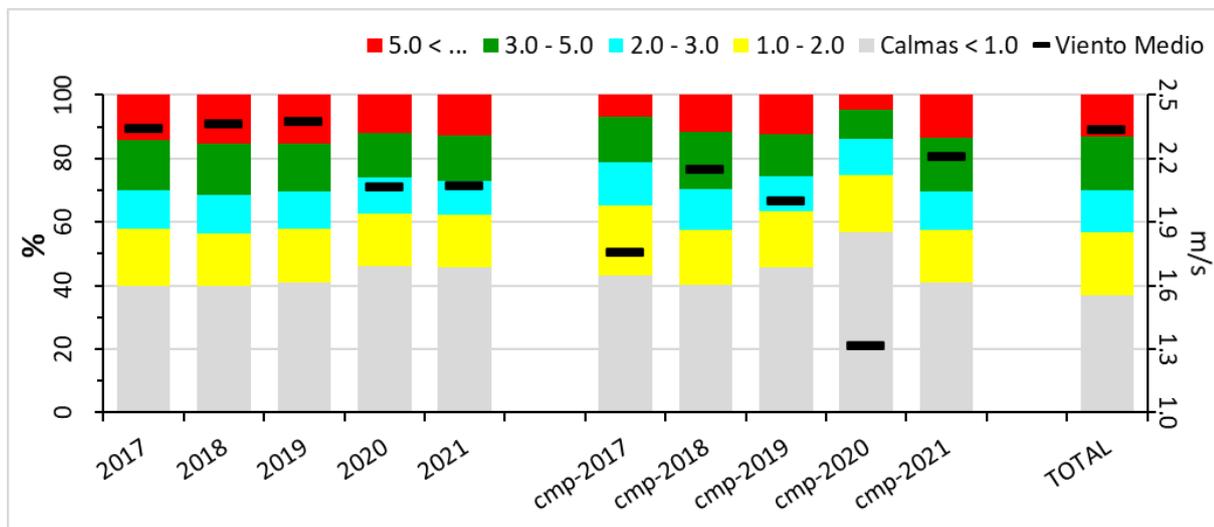


Figura 05. Comparación de los porcentajes de vientos por rangos de intensidad para los periodos anuales y solo campañas (sobre la misma escala de colores de las rosas), junto a la distribución climática (se señalan los valores medios del viento sobre el eje derecho -guion-).

Tráfico vehicular

Los niveles de concentración ambiente de dióxido de nitrógeno en la ciudad de Valencia tienen su origen principal en el tráfico rodado, con un impacto menor y más localizado procedente de las actividades portuarias que, junto a las emisiones de los buques, contribuye también con las de vehículos asociados a las propias operaciones industriales (carga y descarga, distribución, mantenimiento, etc). El sistema circulatorio urbano es muy complejo, aunque cuenta con pautas

de comportamiento sistemáticas que, con diferencias entre las distintas calles, se repiten con gran estabilidad: así, existe una clara onda diurna, con una distribución amesetada durante las horas centrales, una variación semanal, con un descenso los fines de semana, más marcadamente los domingos, y una variación estacional, en la que se aprecian especialmente los periodos vacacionales. Puntualmente modificaciones en el trazado u ordenamiento urbano pueden introducir grandes cambios de intensidad circulatoria que, en la mayoría de los casos se reabsorbe en el entorno próximo. La evaluación del comportamiento del tráfico en el contexto del análisis actual se realizó computando el promedio sobre un gran número de vías circulatorias distribuidas en el entorno de la ciudad (figura 06), cuya evolución media mensual durante los cinco años de interés se presenta en la figura 07 (fuente web Ayuntamiento de Valencia).

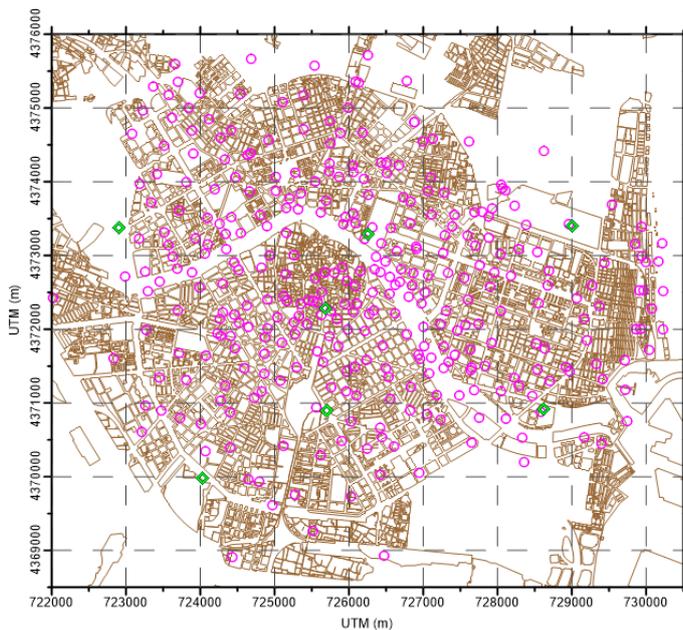


Figura 06. Red de tramos (centroides) sobre los que se promedia la evolución del tráfico anual en la ciudad de Valencia.

Se aprecia un comportamiento regular durante los tres años prepandémicos, con niveles mensuales bastante sostenidos, salvo la caída de agosto, hasta llegar las restricciones por el COVID19, en los que el descenso superó el 75% en los meses más intensos, con una bajada media anual aproximadamente del 33% el primer año y una recuperación hasta solo un 10% a lo largo de 2021. El ajuste de la tendencia indicaría una reducción media de la intensidad circulatoria en el conjunto de todo el casco urbano algo superior al 5%. Sin se calcula la reducción porcentual nodo a nodo y se representa de manera continua en el espacio urbano se obtiene el mapa de la figura 06, donde se observa cómo se distribuye ese porcentaje, con una configuración nítida con un mínimo bien definido en el centro del casco antiguo con reducciones relativas por encima del 20%.

La asociación de la reducción circulatoria con los cambios sociales (incluida la restricción a la movilidad en determinados periodos) derivados de las medidas de lucha contra la propagación del virus parecería fuera de toda duda, en una clara correlación con la intensidad de las medidas y un proceso general de recuperación hacia niveles prepandémicos. Por otra parte, la disminución conjunta sobre la ciudad no parece haber sido uniforme, con un impacto porcentual que se muestra en el mapa de la figura 08, en el que el casco antiguo más céntrico de la ciudad aparece como la zona de mayor descenso relativo. En este caso, la morfología de la distribución pudiera estar condicionada por factores adicionales (p.e. actuaciones urbanísticas, reordenación viaria, etc.) a los inducidos por las medidas generales referidas.

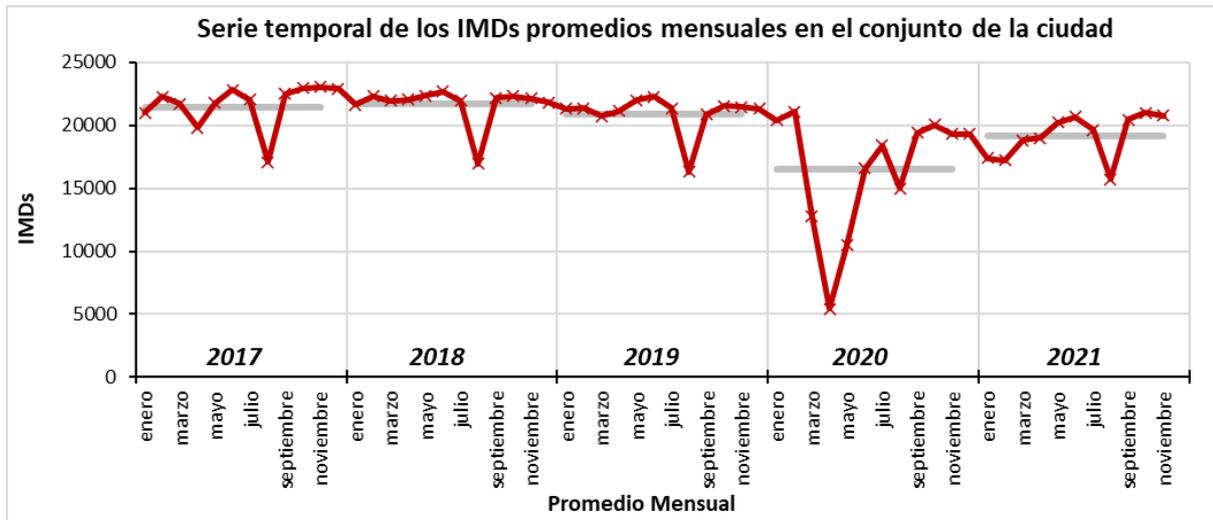


Figura 07. Variación mensual de los IMD promediados (la línea horizontal representa la media anual) sobre un conjunto amplio de vías de la ciudad de Valencia (fuente: web Ayuntamiento de Valencia).

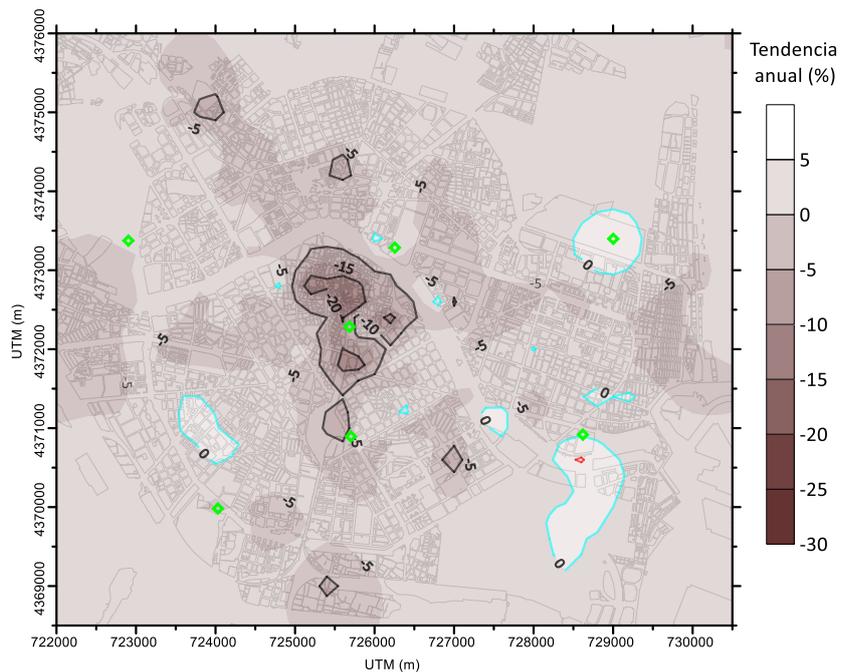


Figura 08. Estimación del porcentaje de variación anual media del tráfico sobre el territorio urbano.

Tráfico portuario

El puerto de Valencia, situado al este sureste del núcleo urbano, por encima de la nueva desembocadura del Turia, y no muy alejado de entramado edificado, ocupa una superficie de más de 5.5 km², con una extensa capacidad de atraque (de más de 13 km distribuidos en numerosos muelles). En el espacio portuario se dispone de instalaciones especializadas de alto



rendimiento para todo tipo de tráfico, que incluye gráneles líquidos y sólidos, mercancía general convencional y de contenedores, así como circulación de pasajeros. La actividad constituye un foco adicional de emisiones a la atmósfera, que procederían del tránsito de buques, así como del automovilístico/ferroviario (en gran medida pesado) derivado del traslado de mercancías hacia/desde los puntos de carga/descarga, así como la propia maquinaria del puerto encargada precisamente de los trabajos de estiba. El potencial impacto de los barcos, a través de sus emisiones, depende fuertemente de su tipología, tamaño y tiempo de permanencia en puerto, por lo que el mero cómputo de atraques no dará necesariamente una idea cuantitativa de su contribución a los niveles de inmisión.

Las gráficas de la figura 09 representan la variación del número de buques atracados en el puerto de Valencia según su diferente naturaleza a lo largo de los cinco años de referencia y la variación relativa respecto al 2017. Puede apreciarse que el año 2020 sí supone una reducción neta del tráfico, con recuperación a lo largo del 2021, aunque sin llegar a los niveles de los tres años anteriores. Numéricamente la categoría con más tráfico corresponde a portacontenedores, seguidos de las naves de pasajeros (en los que se incluyen cruceros y mixtos -ropax-), siendo estos últimos los que proporcionalmente más decrecen en unidades durante el 2020.

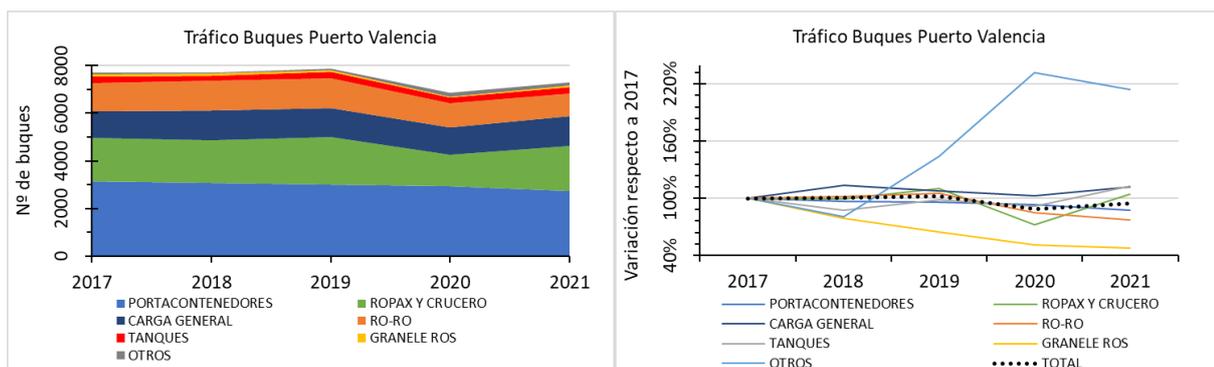


Figura 09. Número y tipología de buques que acceden al puerto de Valencia (fuente: anuarios de la APV) y el porcentaje de variación respecto al 2017 (derecha).

Red de vigilancia

Durante los cinco años de interés las ocho estaciones automáticas (pertenecientes a la red valenciana de vigilancia y control de la calidad del aire) situadas en la ventana espacial de distribución de los captadores pasivos (ver figura 02) muestran una tendencia decreciente general de las concentraciones medias anuales de NO₂, que se representa en las gráficas de las figuras 10 y 11, con una pendiente media de -3.5 (lo que significaría un descenso promedio anual de dicho número de $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con valores individuales que oscilan entre los -8.8 y -1.8, en todos los casos negativos). Este escenario de reducción de los niveles ambiente durante el quinquenio analizado no necesariamente se refleja para los periodos en los que se realizan las campañas de muestreo con los captadores pasivos, lo que se valora en la figura 11, donde junto a la curva media anual se visualiza el promedio de las mismas cabinas durante el tiempo simultáneo de exposición de los dosímetros (barras). La figura pone de manifiesto las diferencias en la representación del año completo solo por el periodo de las campañas, en términos de niveles medios de contaminación ambiente de NO₂, que en todos los casos suele estar algo por encima de la media anual (un 19% en el caso de la mayor diferencia). Pese a ello la tendencia negativa se mantiene igualmente, con una pendiente media muy similar (incluso ligeramente menor: -3.9).



La diferencia en los valores medios de las estaciones automáticas durante las campañas de medidas dosimétricas respecto a los promedios anuales representaría el sesgo muestral debido a una cobertura temporal limitada. Tales factores se utilizarán para corregir (uniformemente) los promedios anuales dosimétricos, aproximándolos al valor poblacional anual.

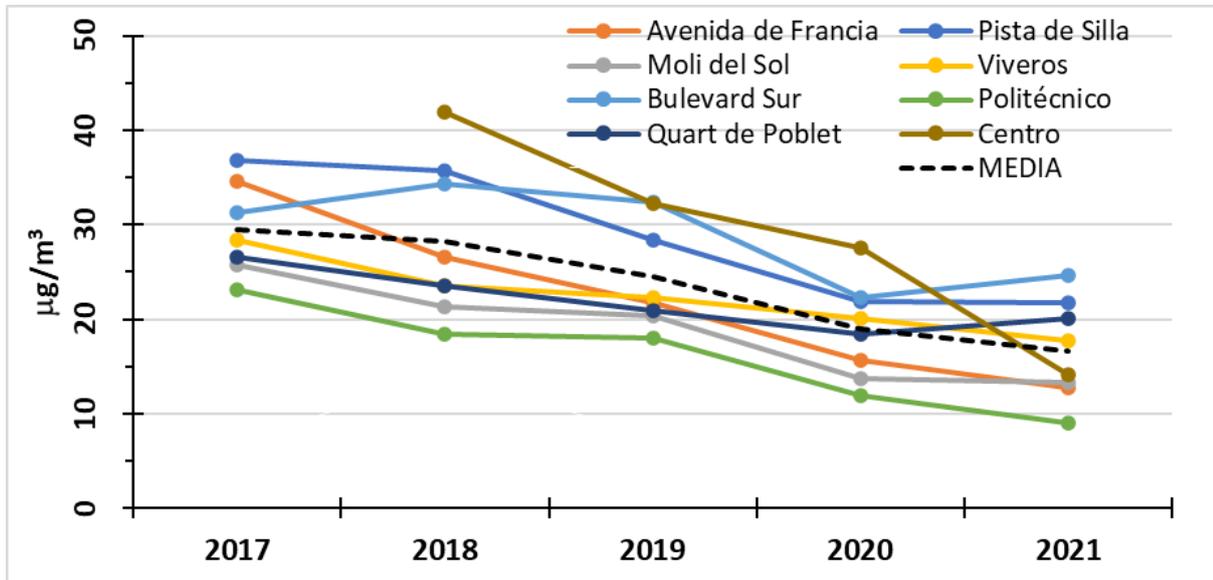


Figura 10. Evolución de las concentraciones medias anuales de NO₂ en las ocho estaciones automáticas dentro de la ventana de la red dosimétrica semirregular; se muestra a trazos la curva promedio.

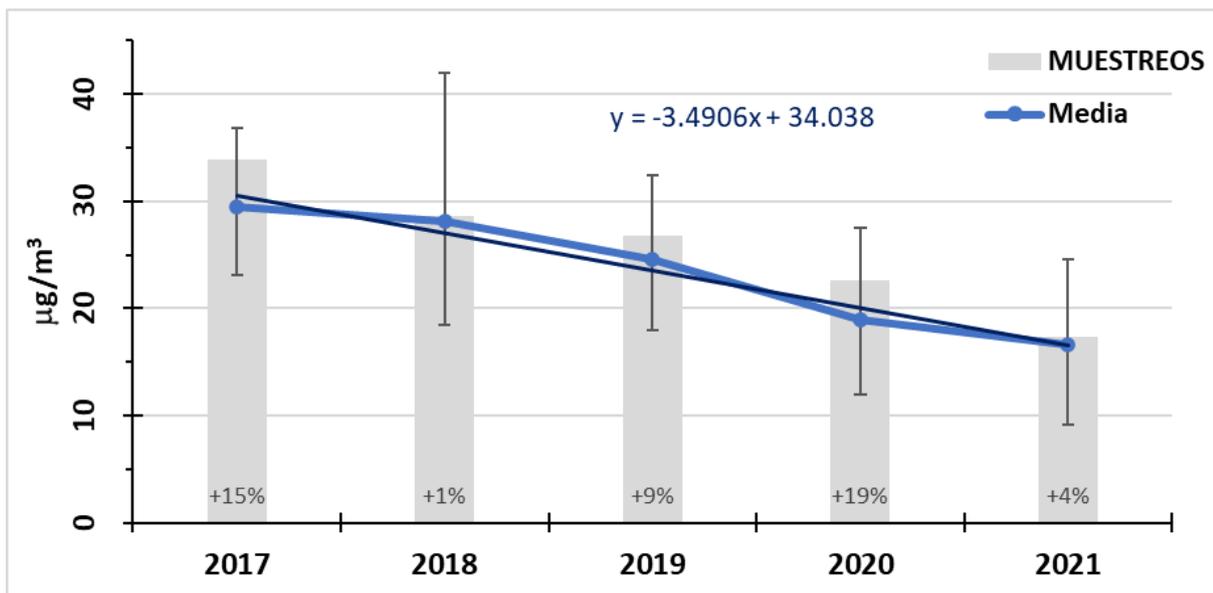


Figura 11. Evolución anual media de las concentraciones de NO₂ en las ocho estaciones automáticas dentro de la ventana de la red dosimétrica semirregular (línea azul, con los máximos y mínimos y el ajuste de la línea de regresión) y valores medios conjuntos (barras grises) coincidentes con los periodos de exposición dosimétrica cada año (el porcentaje indica la diferencia porcentual del periodo de muestreo frente al anual).



Muestreos dosimétricos

La serie de medidas dosimétricas está compuesta por valores de concentración ambiente de dióxido de nitrógeno en 95 puntos distribuidos a lo largo del entramado urbano en un área aproximada de unos 10x10 km (figura 02), correspondientes a promedios aproximadamente semanales. Cuatro campañas anuales permiten obtener mapas continuos de concentración a partir de la interpolación espacial de los promedios en cada nodo, obteniendo la serie de la figura 11. La idoneidad de la muestra como representativa del promedio anual vendrá determinada por el sesgo que podrían introducir las condiciones meteorológicas particulares durante el periodo de medida, como factores de dispersión de las emisiones, junto a posibles diferencias en el comportamiento del tráfico, como origen principal de las especies contaminantes en el escenario urbano. Ambos aspectos ya se introdujeron independientemente en párrafos anteriores. El ajuste a la referencia anual se ha realizado mediante la multiplicación de los datos por el correspondiente factor derivado de la figura 11, bajo el supuesto de que las diferencias muestrales frente al periodo completo que presentan las cabinas serían las mismas, con uniformidad espacial, que afectarían a las mediciones dosimétricas.

Cualitativamente los diferentes mapas anuales (figura 12) muestran una distribución radial, con el máximo absoluto en la zona central del casco antiguo de la ciudad, que disminuye al alejarse, apareciendo algunos máximos secundarios que reflejan la aportación de las grandes vías. Cuantitativamente se aprecian grandes variaciones en los niveles de concentración entre los diferentes años, que se visualizan bien en el trazado de la isocurva de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ representada en todos ellos.

Los valores en cada uno de los nodos de muestreo para los cinco años de estudio se muestran adicionalmente en la figura 13, en relación con los promedios absolutos (obtenidos sobre todo el banco de datos disponibles -figura 03- y su margen de variabilidad). Dos de los años (2017 y 2019) se sitúan ligeramente por encima de los promedios, mientras que el resto tienden a mostrar valores sensiblemente inferiores en todos los nodos, en coherencia también con la figura 15. Lo que se repite, de manera común a todas las campañas analizadas, es la diferencia relativa de los valores entre distintos emplazamientos, lo que habitualmente se interpreta como un patrón característico de la ciudad, determinado por la combinación de su distribución urbanística y flujo circulatorio, donde el efecto dispersivo del viento contribuye a diluir en mayor o menor grado las concentraciones generales, pero manteniendo las diferencias relativas en el espacio, confirmando los resultados de los distintos mapas de la figura 12.

Los valores individuales en el espacio de trabajo recorren un amplio rango de concentraciones, cuyas poblaciones (medias de las cuatro campañas para cada nodo) se resumen estadísticamente en el diagrama de cajas de las figuras 14 y 15, donde se pone de manifiesto respectivamente la variabilidad interanual absoluta y relativa de las medidas de concentración en los diferentes emplazamientos a lo largo del espacio urbano. Con poblaciones que se distribuyen según promedios variables (no presentan una tendencia uniforme en los cinco años, salvo la proverbial bajada de los años 2020 y 2021), pero que reflejan un rango de variabilidad muy constante a lo largo de los años. Los histogramas de las concentraciones dosimétricas de la figura 16 reflejan la forma acampanada de cada curva anual (más apuntada la del 2020), muy similares entre sí, salvo el desplazamiento que refleja las diferencias en las medias, y con una ligera asimetría positiva en todos los casos (media superior a la moda, con sesgo hacia los valores más altos).

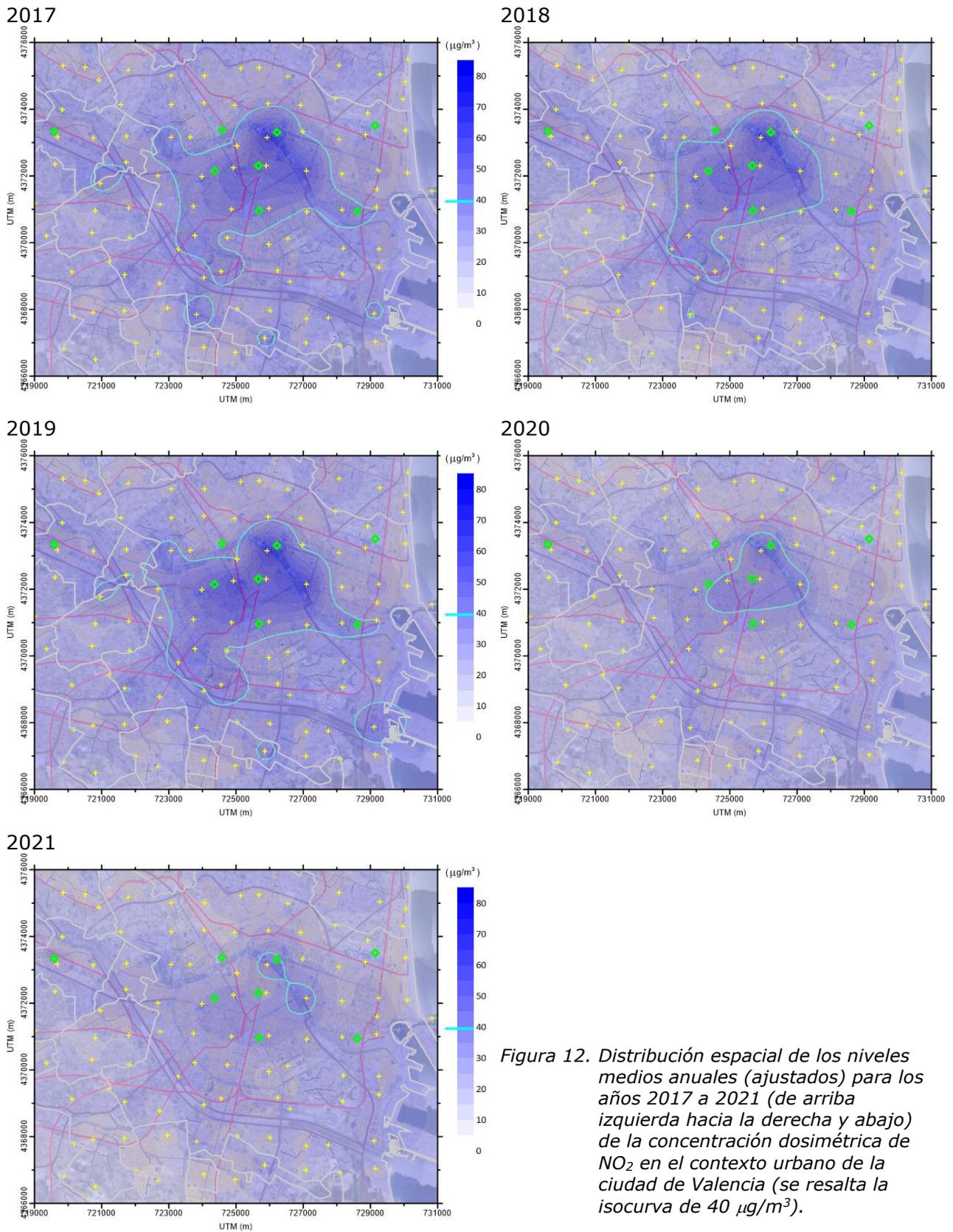


Figura 12. Distribución espacial de los niveles medios anuales (ajustados) para los años 2017 a 2021 (de arriba izquierda hacia la derecha y abajo) de la concentración dosimétrica de NO₂ en el contexto urbano de la ciudad de Valencia (se resalta la isocurva de 40 µg/m³).

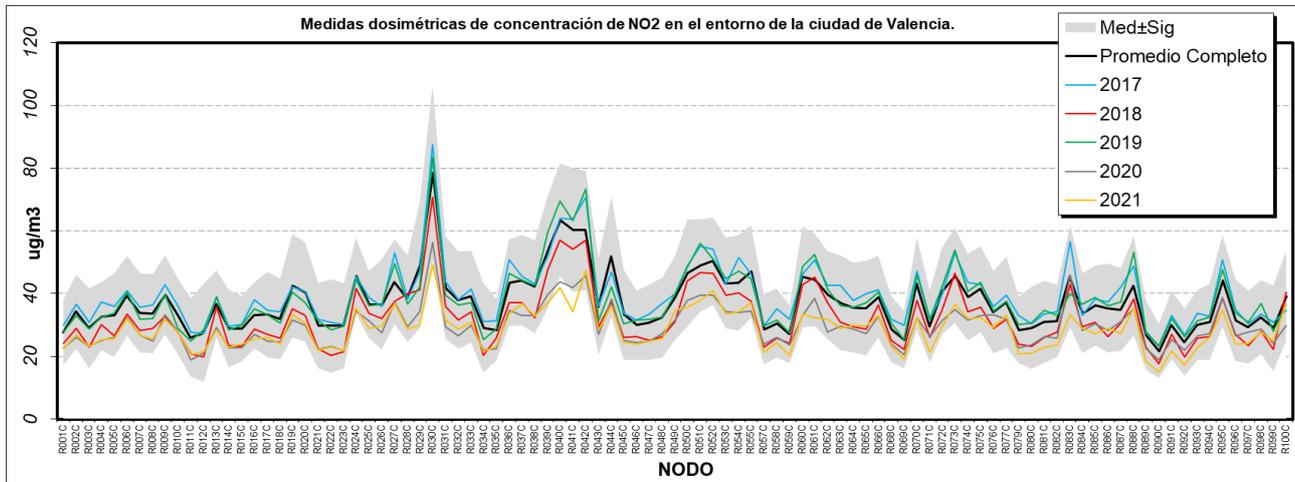


Figura 13. Representación de los valores dosimétricos medios anuales (no corregidos) en los distintos nodos de la red para el periodo 2017-2021 con respecto a la referencia histórica (media \pm sigma).

El ajuste lineal de la media anual dosimétrica para estos cinco años (figura 17) muestra una pendiente de las concentraciones de aproximadamente -2.0 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/año (-1.7 para los datos corregidos) en el conjunto de todo el dominio de medida. Como se vio, la regresión correspondiente de los promedios anuales de las estaciones automáticas (figura 11) arroja una tendencia decreciente algo mayor, cuya discrepancia podría encontrarse en los bajos valores del promedio dosimétrico en el año 2018 frente al resto, que podrían responder a un efecto de la representatividad de los cuatro muestreos anuales respecto al comportamiento medio del propio año. En todo caso el conjunto de estaciones automáticas situadas en el entorno urbano no parece representar el mismo comportamiento que las medidas dosimétricas distribuidas, tal como muestra la diferente variabilidad anual en el quinquenio analizado, según reflejan los valores de la figura 19, donde se evidencia que tampoco la intensidad media de tráfico representa la variable explicativa de los niveles medios pasivos/automáticos.

Si se analiza la tendencia para cada uno de los puntos de medida se puede apreciar que la intensidad del descenso no se distribuye uniformemente en el espacio, sino que presenta un máximo bien definido en el centro del casco antiguo, que coincide en gran medida con la distribución espacial de concentraciones, tal como reflejan los mapas de la figura 18. En este análisis desagregado espacialmente, la anterior ratio promedio de -1.7 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/año alcanza valores inferiores a los -7 . ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)/año en el núcleo central del casco antiguo de la ciudad. La distribución espacial de la tendencia de las concentraciones se corresponde cualitativamente bien con la variación porcentual del tráfico de la figura 08. No obstante, el intento de relacionar los niveles de inmisión con el tráfico, como fuente principal de las emisiones, sobre los valores anuales no refleja una relación directa simple (figura 20), lo que significa que están participando otros factores (p.e. condiciones dispersivas) o que el análisis debería hacerse a escalas menores, en las que la relación entre las intensidades circulatorias y los niveles próximos de contaminación ambiente estuviesen menos mediatizados por el complejo entorno circundante.

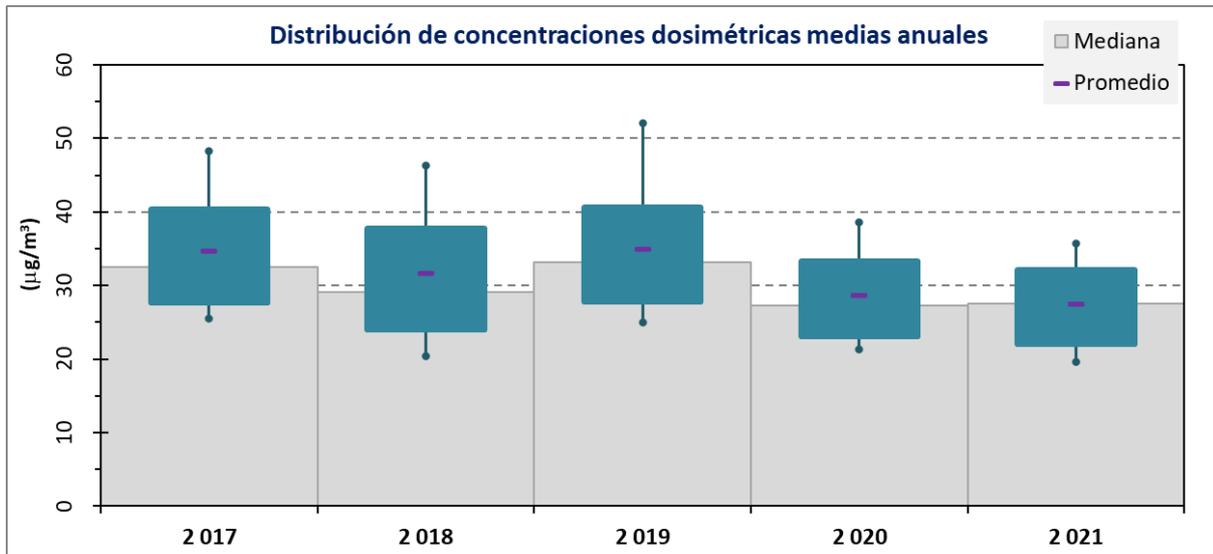


Figura 14. Evolución anual de las poblaciones de concentraciones medias anuales de NO₂ (ajustadas) en cada nodo de la red semirregular (las cajas representan los percentiles 95, 80, 20 y 05).

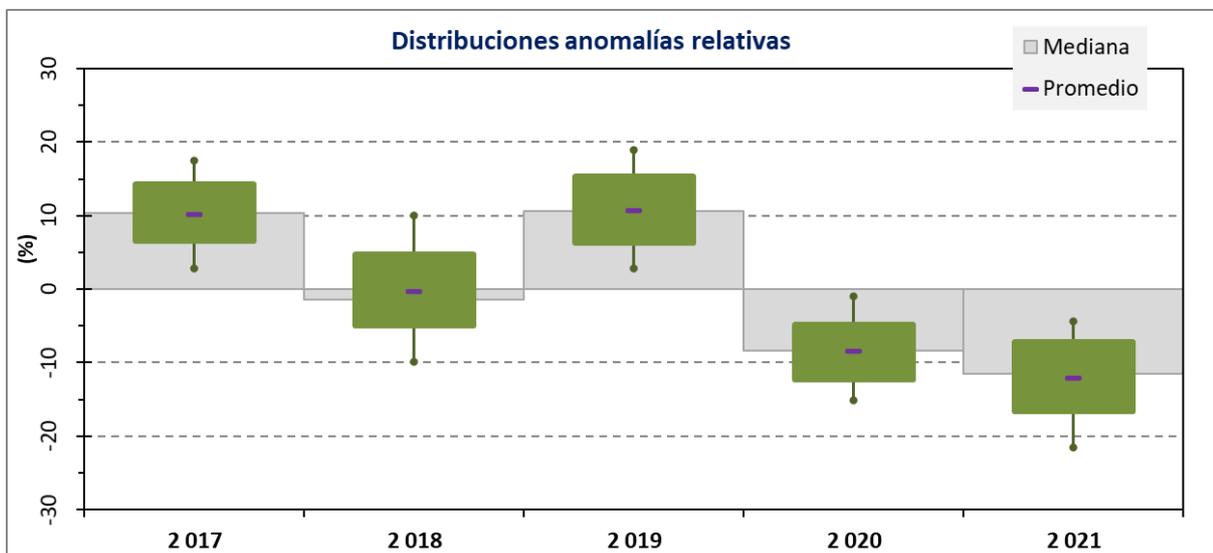


Figura 15. Variación anual de las poblaciones de diferencias relativas de la concentración de NO₂ en cada nodo de la red semirregular respecto a los valores medios del periodo quinquenal (la representación es similar a la de la figura 14).

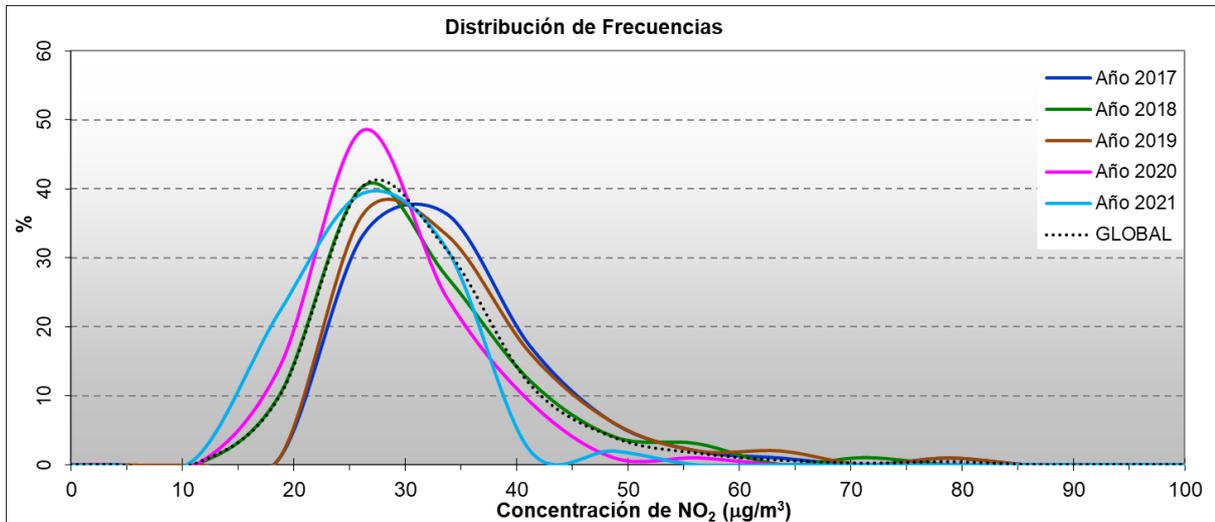


Figura 16. Distribuciones de frecuencias de las medidas dosimétricas medias anuales -ajustadas- de NO₂ para los diferentes nodos de medida de la red semirregular (se representa con línea discontinua la distribución global de los cinco años).

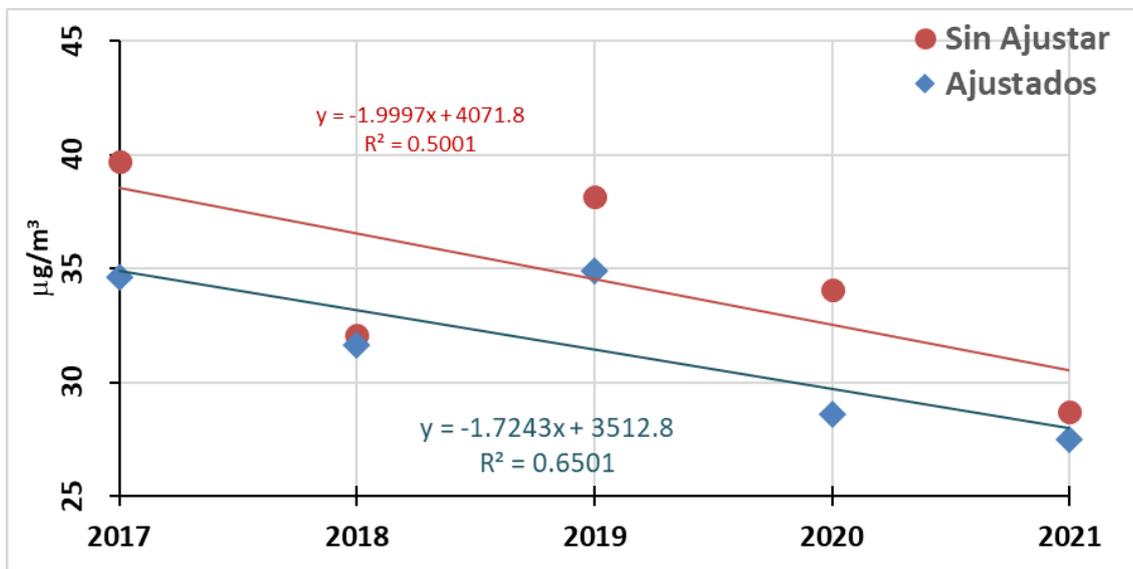


Figura 17. Evolución de los niveles dosimétricos medios absolutos anuales de NO₂ en la red semirregular urbana de Valencia. Se muestran los valores promediados originales y los ajustados por las cabinas (figura 11).

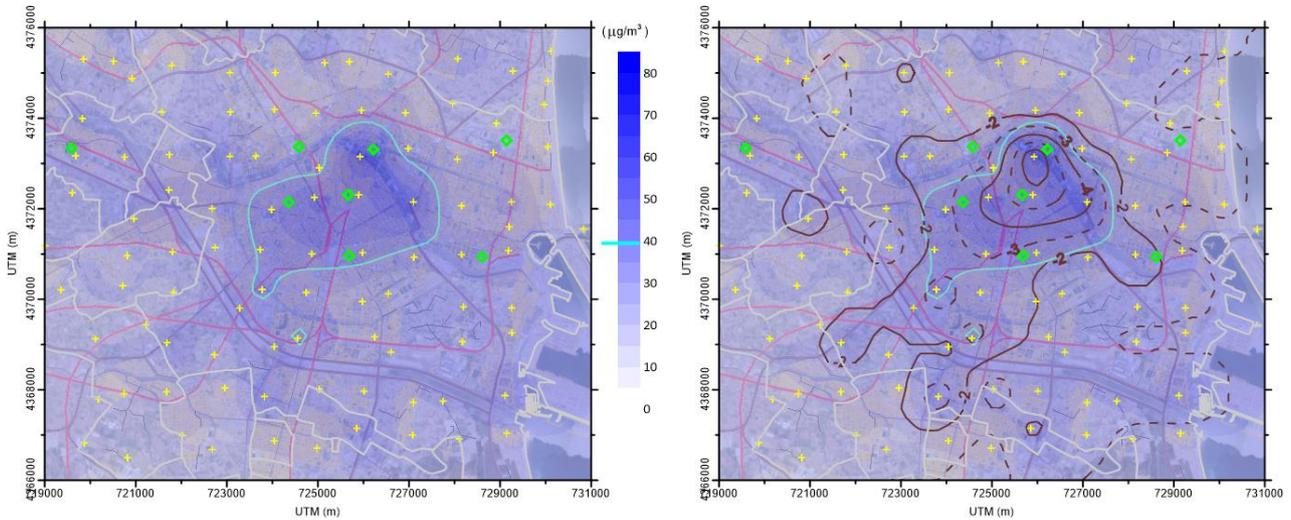


Figura 18. Distribución espacial de los niveles medios (años 2017 a 2021 -ajustados-) de concentración dosimétrica de NO₂ en el contexto urbano de la ciudad de Valencia (izquierda), junto a los valores ajustados de la tendencia en (µg/m³)/año (línea negra en el mapa de la derecha).

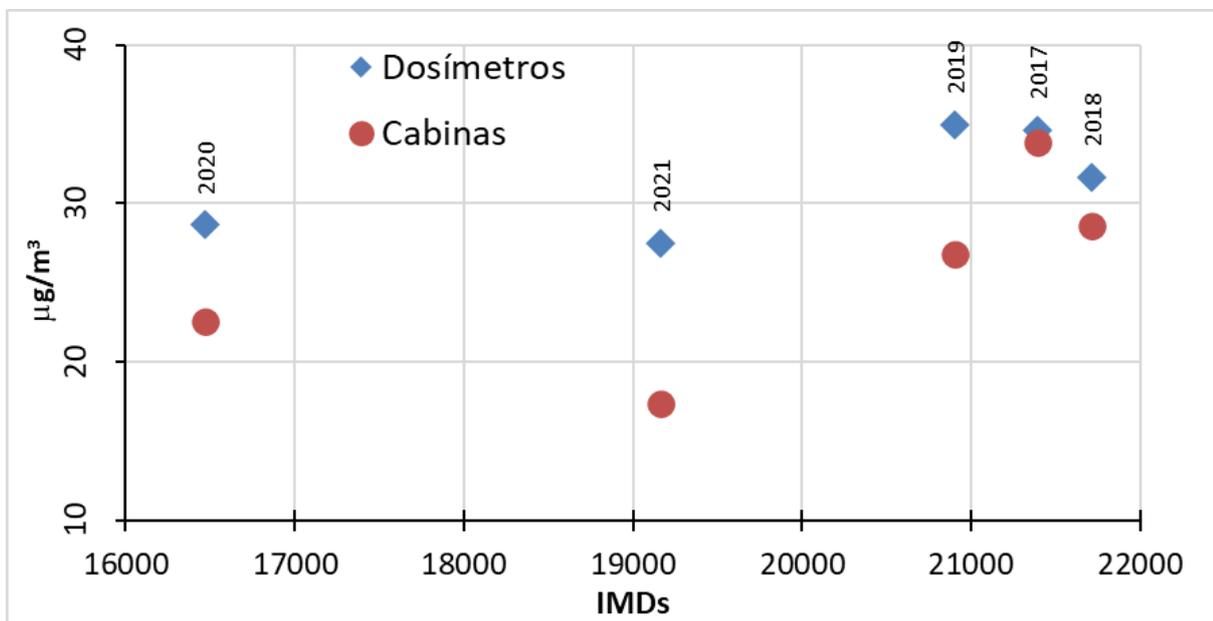


Figura 19. Relación entre los niveles medios anuales de las concentraciones dosimétricas en la red semirregular y las medidas automáticas (promediadas para las ocho estaciones y solo los periodos coincidentes con los muestreos) frente al tráfico medio en la ciudad.

El intento de correlacionar las intensidades circulatorias (IMDs) en el contexto urbano y los niveles de concentración ambiente de contaminantes (NO₂) presentan el problema de un entorno muy complejo en que la relación directa entre focos próximos (tráfico) y niveles ambientales se manifiestan fuertemente modulados por un entorno circundante en el que las emisiones se producen continuamente en todo el entramado viario, dispersándose a su alrededor bajo el efecto del viento presente, que interacciona con las edificaciones aledañas (alternancia de calles y edificaciones, que provocan intensas canalizaciones y turbulencias).

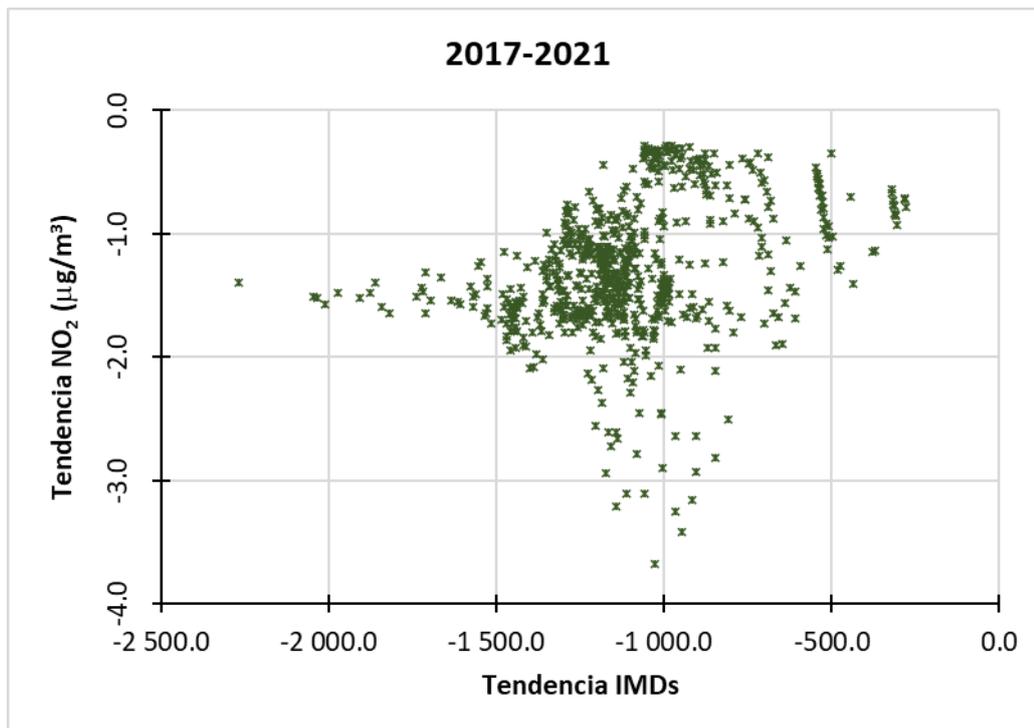


Figura 20. Relación entre los valores numéricos interpolados sobre el área urbana (figura 02) de las tendencias anuales de tráfico rodado y las correspondientes tendencias anuales de los niveles de NO₂, de acuerdo a los valores presentados.

A partir de los niveles interpolados de concentración de dióxido de nitrógeno (ver figuras 12 y 18) y de las correspondientes intensidades medias diarias de tráfico (ver figuras 06 y 08), diferentes ensayos han puesto de manifiesto una ausencia clara de patrones, a falta de un posible análisis más detallado. Como ejemplo no definitivo la figura adjunta relaciona, en el espacio interpolado de las tendencias viarias (figura 08) y de los niveles de NO₂ (figura 18), los valores ajustados de las relativas pendientes para cada pixel (~200m de resolución). Sin una relación bien definida, sí aparecen algunos comportamientos asintóticos en los que una tendencia decreciente de los IMDs conduce a reducciones constantes de los niveles ambiente de dióxido de nitrógeno, a la vez que la tendencia a la baja de estos se corresponde con pendientes estables de las tasas de variación del número de vehículos. La lectura de las conclusiones anteriores debe hacerse en el contexto de una fuerte interrelación en el espacio urbano de los niveles de contaminación en un punto dado respecto al comportamiento de todos los factores contribuyentes en el entorno circundante más o menos extenso.



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La ciudad de Valencia, en una situación compartida por numerosas urbes de gran tamaño, presenta niveles elevados de óxidos de nitrógeno, asociados principalmente al tráfico rodado, que en el pasado condujeron a situaciones de incumplimiento normativo en alguna de las estaciones de vigilancia (promedio anual por encima del umbral de protección a la salud). Se trata de entornos físicamente complejos, con emisiones difusas embebidas en su seno, sometidas a los procesos dispersivos atmosféricos, lo que genera fuertes gradientes espaciales junto a una gran variabilidad temporal. Por otro lado, se trata de entornos muy sensibles ya que concentran una gran densidad de población, lo que supone una importante exposición de sus habitantes a los niveles de inmisión reinantes.

En tales situaciones las redes de vigilancia, necesariamente con un dimensionamiento limitado, no proporcionan una imagen realista del comportamiento del sistema de contaminantes, con una estructura mucho más rica que la que pueden reflejar un conjunto pequeño de emplazamientos. En este sentido, el complemento de las mediciones automáticas con otros procedimientos de muestreo, que permiten una mayor cobertura espacial, permite compensar en gran medida las carencias referidas.

Dentro de un programa sistemático de medición de los niveles de dióxido de nitrógeno mediante captadores pasivos en el entorno de la ciudad de Valencia se han venido realizando en los últimos años secuencias de cuatro campañas anuales distribuidas estacionalmente, siguiendo un procedimiento establecido, con la distribución de casi un centenar de elementos de medidas dentro de una red semirregular de unos 10x10 km, asegurando un muestreo en algún punto de cada una de las gradillas de 1 km de resolución. En concreto se dispone en este momento de un periodo de cinco años (2017-2021) con los cuatro muestreos completos, que permiten una primera evaluación de las secuencias de medidas, con la importante advertencia de que el 2020 registró una inusitada perturbación debida a las fuertes restricciones impuestas en la lucha contra la pandemia por COVID19 y que alteraron profundamente la actividad socioeconómica durante algunos meses (entre otras cosas con una importante restricción de la movilidad). En este escenario el tráfico urbano de la ciudad sí refleja una fuerte caída durante el segundo trimestre del 2020, con una notable recuperación a lo largo de la segunda mitad, mientras que el 2021 aún mantiene una muy moderada reducción (~10%) respecto a los valores medios prepandémicos. A su vez se aprecia una reducción de los buques que atracan en el puerto de la ciudad para el 2020, especialmente en lo que se refiere a los que transportan pasajeros (cruceros y ferris), tráfico que numéricamente se muestra prácticamente normalizado en el 2021.

Las medidas dosimétricas proporcionan una imagen espacial del campo de contaminación urbana por NO₂ mucho más detallada que la obtenida por las ocho estaciones automáticas situadas en la misma superficie. Por el contrario, las primeras pueden estar fuertemente sesgadas por la corta cobertura temporal, contando con continuidad en el caso del equipamiento electrónico, que fue utilizado para corregir las diferencias del muestreo discreto respecto al anual.

Los patrones de distribución espacial de los niveles ambientales de dióxido de nitrógeno varían cuantitativamente entre años, pero morfológicamente reproducen distribuciones parecidas en torno al casco urbano, reflejando la influencia interdependiente del conjunto urbanístico (distribución de calles y edificaciones), el flujo circulatorio (principales focos emisores) y la meteorología reinante (responsable de los procesos dispersivos), sobre el campo de concentraciones ambiente.

Las medidas automáticas en el conjunto de la ciudad muestran una tendencia decreciente en el periodo de cinco años analizado, que se ajustaría a una reducción de unos 3.5 µg/m³ por año (en una horquilla que individualmente recorre el rango de -8.8 a -1.6 µg/m³, en todos los casos decrecientes). Los valores automáticos de las estaciones, con cobertura anual, se utilizaron para corregir el sesgo muestral de las campañas dosimétricas individuales para ajustarlas a la media anual.



Las mediciones dosimétricas en el conjunto urbano, una vez corregidas al factor anual, también reflejan una tendencia decreciente, que en conjunto de la centena de emplazamientos se cuantificaría en una reducción media de $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$, con un amplio abanico en los nodos individuales, que alcanzaría mínimos de $-7.2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{año}$, en todos los casos negativo.

La distribución espacial de las tendencias anuales de las concentraciones de NO₂ muestran un patrón bien definido, que cualitativamente se corresponde con el de niveles promedio y el de las correspondientes tendencias de la intensidad circulatoria, y que para los cinco años analizados resultan negativas en todo el ámbito urbano considerado. Los mínimos se localizan así en torno al núcleo antiguo de la ciudad, donde también se centran las concentraciones más elevadas y, si no las mayores intensidades de tráfico, sí la zona en la que se documentan los mayores descensos relativos. Más allá de esta relación cualitativa, cuantitativamente la correspondencia directa entre la tendencia de los niveles de inmisión y la intensidad circulatoria se manifiesta muy difusa, previsiblemente fuertemente mediatizada por la influencia dispersiva del entorno circundante.