

CAMBIOS ESPACIALES Y TEMPORALES EN LA CONTAMINACIÓN POR DIÓXIDO DE NITRÓGENO EN EL MUNICIPIO DE MADRID (2001-2011)*

María Rosa Cañada Torrecilla**
Universidad Autónoma de Madrid

RESUMEN

En este trabajo se ha abordado el estudio de la concentración atmosférica de dióxido de nitrógeno en el municipio de Madrid entre 2001 y 2011 y de las desigualdades ambientales entre distritos. Entre esas dos fechas se ha producido un cambio en la red de calidad del aire, que ha propiciado un objetivo complementario de carácter metodológico, consistente en evaluar si ese cambio en la ubicación y en la reducción del número de estaciones afecta decisivamente a los resultados de los valores estimados de NO₂ mediante interpolación.

Palabras clave: modelado espacial; calidad ambiental; desigualdades intraurbanas; sistemas de información geográfica; Madrid.

Spatial and temporary changes in the pollution by dioxide of nitrogen in the municipality of Madrid (2001-2011)

ABSTRACT

This paper approaches the study of concentration levels of Nitrogen Dioxide (NO₂) in atmosphere around the municipality of Madrid in 2001 and 2011 and the environmental inequities between districts. Between those two dates, significant changes in the Public Air Quality Network took place, leading to another additional methodological objective, consisting of assessing whether the change in location and the reduction of the number of stations could yield a decisive effect on NO₂ value, estimated by interpolation.

Keywords: spatial modeling, environmental quality, intraurban inequalities, geographical information systems, Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire desempeña un papel crucial en el bienestar físico, mental y social de los seres humanos. A pesar de las significativas mejoras producidas, siguen existiendo importantes diferencias entre países, dentro de un mismo país y entre barrios de una misma ciudad (Cañada, 2004a, 2004b; Cañada, Vidal y Moreno, 2011; Vidal, Moreno y Cañada, 2011). Las importantes diferencias en la calidad del medio ambiente dependen de las diversas presiones relacionadas, por ejemplo, con la urbanización, la contaminación y el uso de los recursos naturales. Los niveles

Fecha de recepción: 20 de abril de 2012.

Fecha de aceptación: 9 de julio de 2012.

* Esta investigación se desarrolla dentro del Proyecto de Cooperación Interuniversitaria Universidad Autónoma de Madrid-Banco de Santander con América Latina: *La justicia ambiental como componente del desarrollo socio-territorial. Métodos para su evaluación apoyados en sistemas de información*. Años 2011-2012.

** Departamento de Geografía. Universidad Autónoma de Madrid. C/ Francisco Tomás y Valiente, 1. 28049 Madrid (España). E-mail: rosa.canada@uam.es

de exposición y los riesgos asociados para la salud, así como los beneficios de la reducción de la contaminación y de un medio ambiente natural, no se distribuyen de forma uniforme dentro de las poblaciones. Los estudios demuestran que unas malas condiciones ambientales afectan especialmente a los grupos más vulnerables (Moreno y Cañada, 2007).

Las principales políticas de los países pretenden conseguir un medio ambiente en el que el nivel de contaminación no dé lugar a efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente, y en el que los grupos de población más vulnerables estén protegidos.

Entre las políticas que se están desarrollando a nivel europeo destaca el Sexto Programa de Acción en Materia de Medio Ambiente (6PAMA), la Estrategia sobre Medio Ambiente y Salud, el Plan de Acción 2004-2010 de la UE, el proceso paneuropeo de Medio Ambiente y Salud de la OMS y la Directiva 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, que es la norma europea más reciente que regula la evaluación de la calidad del aire y establece los niveles de los contaminantes que son más relevantes por sus efectos en la salud humana, entre los que se encuentran el dióxido de nitrógeno.

En España la Administración General del Estado ha elaborado un Plan Nacional de Mejora de la Calidad del Aire (PNMCA), Real Decreto 102/2011, de 28 de enero (incorpora al Ordenamiento jurídico interno la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo del 21 de mayo de 2008), cuyo objetivo general es lograr el cumplimiento de los valores límite para todas las zonas en las que existan superaciones, lo antes posible, y en todo caso, no más tarde de 2015. En concreto se plantea el cumplimiento de los valores límites de PM_{10} y NO_2 y la reducción simultánea de precursores de ozono. En lo que respecta al contaminante NO_2 , que es el que se estudia en este trabajo, el límite horario se fija en $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ no pudiendo superarse en más de 18 ocasiones al año y el valor anual se establece en $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PNMCA, 2011).

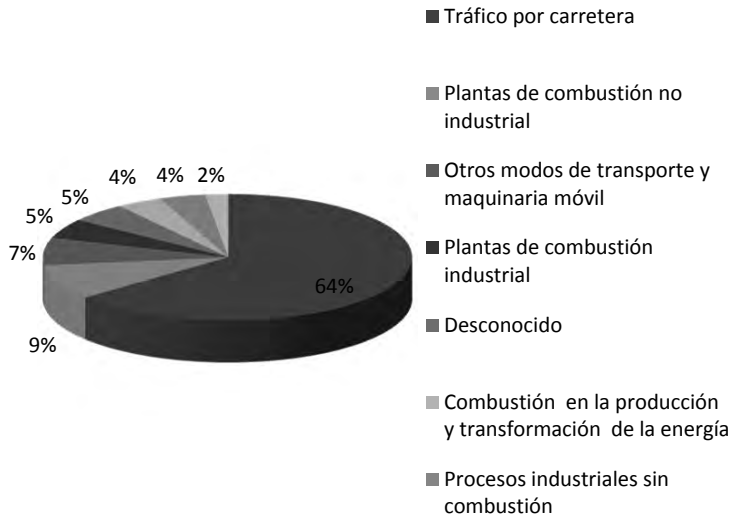
Este Plan pretende reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno mediante la aplicación de medidas arbitrarias para NO_2 , junto con actuaciones integradas en los grandes planes sectoriales actualmente en vigor (Plan Nacional de Techos, Plan Nacional de Grandes Instalaciones de Combustión, ruido, cambio climático, etc.) y los planes autonómicos y locales.

Por lo tanto, existen varios sectores (energético, transporte, industrial, etc...) que contribuyen a las emisiones directas de NO_2 , aunque no se debe olvidar que se trata de un problema urbano y local y que la fuente principal es el tráfico rodado (figura 1).

Para asegurar el cumplimiento de todos los objetivos del PNMCA, el Ayuntamiento de Madrid ha redactado el Plan de Calidad del Aire 2011-2015 (aun no aprobado). De manera concreta, con él se pretende una mejora de la calidad del aire para el dióxido de nitrógeno, conforme lo dispuesto en el artículo 24 del Real Decreto 102/2011.

Es un plan que no sólo recoge acciones directas sobre las fuentes de emisión sino también acciones sobre políticas municipales, que van desde la fiscal, pasando por la urbanística, a la de educación (Proyecto del Plan de Calidad del Aire de la Ciudad de Madrid 2011-2015, p. 11). El Plan dedica medidas destinadas tanto a reducir las emisiones del tráfico, principal sector emisor, como las del sector residencial, comercial e institucional y la gestión de los residuos.

No se debe olvidar que el NO_2 es un gas de efecto invernadero y que el conocimiento de sus variaciones espacio temporales es muy importante para el análisis del cambio global.

Figura 1. Principales fuentes de emisión de NO₂.

Elaboración propia a partir del PNMA del 2011.

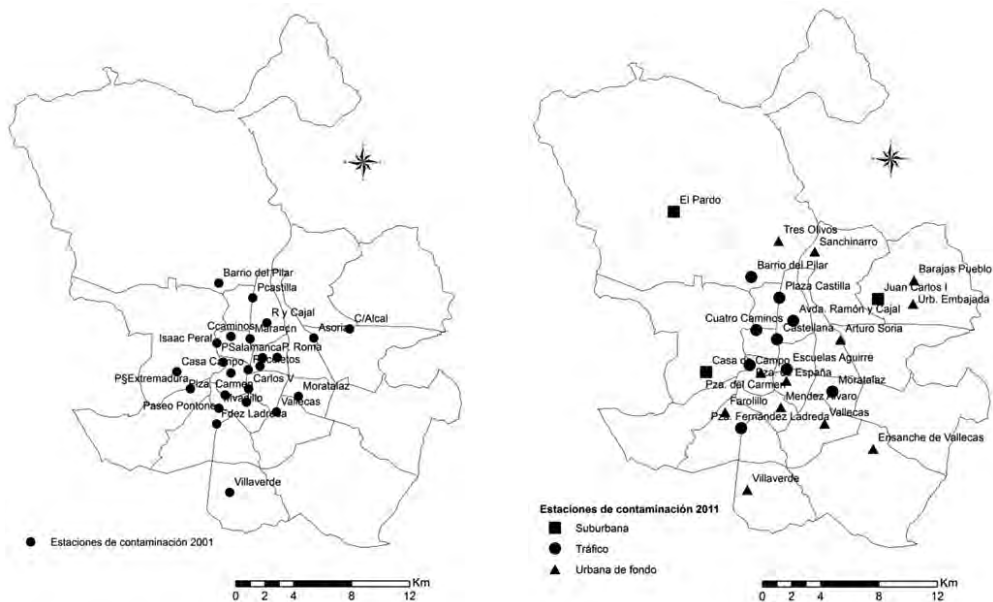
2. CONSIDERACIONES METODOLÓGICAS Y TÉCNICAS

2.1. Las fuentes de los datos

Los datos utilizados para esta investigación provienen de la red de vigilancia de la calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid. Esta red empezó a funcionar a finales de los años sesenta y se ha tenido que ir adaptando a una legislación de calidad de aire cada vez más exigente. Los años elegidos para su comparación son el 2001 por ser la fecha en la que se realiza la primera evaluación de la calidad del aire de acuerdo a la Directiva 1999/30/CE y el correspondiente Real Decreto 1073/2002, que obligaba a evaluar la calidad del aire en todo el territorio de los estados miembros, y el 2011, un año después de la puesta en marcha de la nueva red de calidad del aire, diseñada para el cumplimiento de la Directiva 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa.

La nueva red de vigilancia de la calidad del aire permite armonizar y mejorar la comparabilidad de los sistemas de vigilancia de calidad del aire entre los distintos países de la Unión Europea, en lo relativo a la tipología de las estaciones y sus criterios de implantación, pero también responde a la necesidad de evaluar la calidad del aire de amplios espacios que han ido surgiendo como consecuencia del desarrollo urbano de los últimos años en Madrid y que no se medían en la antigua red. Está formada por 24 estaciones de medición automáticas, número muy superior al mínimo de puntos de muestreo establecido por la legislación en función de la población de Madrid que es 7. En cuanto al número total de estaciones de fondo urbano para NO₂ no podrá ser más de dos veces superior o más de dos veces inferior al número total de estaciones de tráfico. En 2001 no había normativa que regulara la tipología de las 25 estaciones de la red (figura 2).

Figuras 2 y 3. Distribución de las estaciones de la red de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid del 2001 y 2011.



Fuente: Elaboración propia.

La nueva red de medición de NO_2 de 2011 busca un equilibrio entre las estaciones urbanas de fondo (12) y de tráfico (9), sin olvidar la zona suburbana (3) que no se medía en la antigua red. La nueva configuración asegura la representatividad espacial de las mediciones (figura 3).

Sin embargo el hecho de que hayan desaparecido algunas estaciones y se hayan implantado otras nuevas, genera problemas de representatividad de los datos si queremos analizar su evolución espacio temporal. Por ello, se ha trabajado con cuatro bases de datos diferentes: la de 2001 con 25 estaciones, la de 2011 con 24, y la de las estaciones comunes del 2001 y 2011, que han permanecido en la red en esos años, que se reduce a 11 (figura 4).

¿Es preferible hacer el estudio con una red más amplia en aras de disponer de más puntos de cara a una mayor cobertura espacial para interpolar? ¿O es mejor trabajar sólo con las estaciones comunes, por ser una muestra más homogénea, aunque con una menor cobertura espacial y por lo tanto con un menor número de vecinos para la interpolación? A largo de este trabajo se irá dando respuesta a estas preguntas según se vayan exponiendo los resultados.

La cartografía digital utilizada, mapa de distritos y del término municipal de Madrid, procede del IECM para el año 2001 y del INE para el 2011.

La variable objeto de estudio es la concentración media anual de NO_2 cuyo valor límite anual para la protección de la salud se sitúa en $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 4. Distribución de las estaciones de contaminación comunes 2001-2011.



2.2. Metodología

Como las estaciones de contaminación no están repartidas de manera homogénea por todo el municipio de Madrid se ha recurrido a incorporar la información de algunas estaciones limítrofes (exteriores al municipio de Madrid pero a una distancia no superior a 3,5 km) pertenecientes a la red de contaminación de la Consejería de Medio ambiente de la Comunidad de Madrid. De este modo se ha dispuesto de una red lo más amplia posible de puntos muestrales con los que interpolar y modelar el patrón espacial del dióxido de nitrógeno y así generar información en aquellas zonas carentes de datos. En concreto se han utilizado 6 estaciones para 2001 y 8 estaciones para 2011.

El objetivo general radica en describir y valorar la situación y los cambios producidos en los niveles de NO_2 en el periodo comprendido entre 2001-2011. A tal fin se estudiarán primero los patrones de distribución espacial con un nivel de desagregación espacial elevado y luego se analizarán las desigualdades ambientales que emergen entre distritos en esos dos momentos temporales.

El modelado espacial de la variable NO_2 anual se ha realizado con el método de interpolación *media ponderada por el inverso de la distancia* (*Inverse Distance Weighting*), cuya fórmula de cálculo es:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i * Z(s_i)$$

donde $Z(s_0)$ es el valor que se intenta predecir para el lugar s_0 , N es el número de puntos muestrales alrededor del lugar que se va a predecir y que serán tenidos en cuenta en el cálculo, λ_i es el peso asignado a cada punto muestral y $Z(s_i)$ es el valor observado del lugar s_i .

Los pesos se determinan mediante la formula: $\lambda_i = d_{i0}^{-p} / \sum_{i=1}^N d_{i0}^{-p}$ donde d_{i0} es la distancia entre el lugar de predicción s_0 y cada lugar muestral s_i , a medida que la distancia se hace más grande, el peso es reducido por un factor p (Cañada, 2007, p. 793; Krivoruchko, 2011).

En una primera fase, este método se ha aplicado a 25 estaciones del año 2001 y a 24 del año 2011, mediante la extensión *Geostatistical Analyst* de ArcGIS. En una segunda fase, se ha trabajado con las 11 estaciones que han permanecido sin cambios en la red durante los años 2001 y 2011. El objetivo es evaluar si el cambio en la ubicación y en la reducción del número de estaciones afecta decisivamente a los resultados de los valores estimados de NO_2 .

Después de varios ensayos, los parámetros utilizados en la interpolación son aquellos que han producido los menores errores en la predicción, están recogidos en la tabla 1; en la tabla 2, figuran los estadísticos que permiten validar los modelos.

Tabla 1. Parámetros utilizados en la interpolación.

| PARAMETROS UTILIZADOS | 2001 (25 estaciones) | 2011 (24 estaciones) | 2001 (11 estaciones) | 2011 (11 estaciones) |
|-----------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Nº vecinos | 7/4 | 7/3 | 7/3 | 7/3 |
| Valor de p | 1,11 | 1 | 1 | 1 |
| Búsqueda de vecindad | Círculo dividido en 4 sectores de 45° | Círculo dividido en 8 sectores | Círculo dividido en 4 sectores de 45° | Círculo dividido en 4 sectores de 45° |

Tabla 2. Validación del modelo: errores de la predicción.

| | 2001 (25 estaciones) | 2011 (24 estaciones) | 2001 (11 estaciones) | 2011 (11 estaciones) |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| \bar{X} errores | 2,95 | 1,6 | 2,23 | 1,62 |
| Error cuadrático medio | 12,97 | 9,12 | 13,25 | 9,16 |

El número de vecinos considerados para interpolar han sido 7, considerando al menos 3 ó 4, el valor del peso ha sido 1 y la forma de búsqueda de vecindad, un círculo dividido en cuatro sectores de 45°, salvo para 2011, en el que se ha seleccionado el círculo dividido en 8 sectores.

Las capas obtenidas de la interpolación se han transformado a raster con un tamaño de celda de 50 m. Con la extensión *Spatial Analyst* y mediante el comando *Raster calculator* se han recortado para ajustarlas a los límites del municipio de Madrid. Ha sido necesario reclasificarlas para obtener los intervalos que ayuden al análisis y a su descripción.

3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Estadísticos descriptivos del NO₂ a partir de los valores observados en las estaciones de contaminación y de los valores pronosticados por la interpolación

Entre 2001 y 2011 se ha producido una importante disminución en la concentración atmosférica de NO₂ sobre todo en los valores máximos y en la media (tabla 3). Si se tienen en cuenta las estaciones que se han mantenido en la red de vigilancia durante 2001 y 2011 la disminución también se ha producido pero en menor medida (tabla 4). Frente a una reducción de 29 µg/m³ en los valores máximos se pasa a solamente 13 µg/m³; en el caso de la media sucede lo mismo, hay una reducción de 18 µg/m³ en el primer caso y sólo baja 8,9 µg/m³ en el segundo. Este hecho se explica, por un lado, porque no se contabilizan algunas nuevas estaciones periféricas (Sanchinarro o Tres Olivos) que presentan niveles bajos de NO₂ y que no existían en 2001, y, por otro, porque no se contabilizan algunas estaciones de tráfico que han desaparecido, por ejemplo, Recoletos que registró el valor máximo en 2001.

La situación es diferente si el análisis se realiza comparando los valores de cada año con la red completa o con la red de observatorios comunes. En el año 2001 el valor medio pasa de 62,9 µg/m³ si se tiene cuenta toda la red a 59,4 µg/m³ con sólo los observatorios comunes. La razón es que en la nueva red se quitan muchas estaciones de tráfico que son las que registraban tasas más elevadas de contaminación.

Sin embargo, en el año 2011, el valor medio se eleva, pasa de 44,9 a 50,5 µg/m³, al no tener en cuenta estaciones suburbanas que son las que registran los valores más bajos y que por lo tanto contribuirían a bajar el valor de la media.

En cuanto a los valores máximos, el año 2001 experimenta una reducción de 16 µg/m³, de tener presente toda la red o sólo las 11 estaciones comunes; la explicación es la misma que se ha utilizado para la media; mientras que en el 2011 no varía, es 63 µg/m³, es decir, es igual utilizar 32 que 11 estaciones.

En 2011 el valor mínimo es idéntico en ambas redes, 36 µg/m³ y, sin embargo, en 2011 aumenta, pasa de 23 a 29 µg/m³.

Como conclusión, se puede afirmar que no es indiferente utilizar toda la red o sólo las estaciones comunes. La mejoría de la calidad del aire es mucho más evidente en el primer caso que en el segundo. Por ello, para ver la evolución temporal del dióxido de nitrógeno es mejor utilizar las estaciones que han permanecido en la red durante el periodo analizado, de este modo se asegura la consistencia y homogeneidad de la serie histórica, a pesar de tener menos representatividad espacial. Sin embargo en este trabajo se mostrarán los resultados obtenidos con las dos series de datos.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de los datos observados y estimados de concentración media anual de NO₂ de la red completa en µg/m³.

| ESTADÍSTICOS | DATOS OBSERVADOS | | DATOS PRONOSTICADOS | |
|--------------|------------------|------|---------------------|------|
| | 2001 | 2011 | 2001 | 2011 |
| Media | 62,9 | 44,9 | 55,7 | 41,8 |
| Des. típica | 12,6 | 9,4 | 5,7 | 4,1 |
| Máximo | 92 | 63 | 91,4 | 62,3 |
| Mínimo | 36 | 23 | 37,1 | 23,2 |
| Amplitud | 56 | 40 | 54,3 | 39,1 |

Tabla 4. Estadísticos descriptivos de los datos observados y estimados de concentración media anual de NO₂ de las estaciones comunes en µg/m³.

| ESTADÍSTICOS | DATOS OBSERVADOS | | DATOS PRONOSTICADOS | |
|--------------|------------------|------|---------------------|------|
| | 2001 | 2011 | 2001 | 2011 |
| Media | 59,4 | 50,5 | 53,2 | 47,7 |
| Des. típica | 12 | 8,5 | 5,13 | 2,5 |
| Máximo | 76 | 63 | 74,9 | 62,3 |
| Mínimo | 36 | 29 | 37,2 | 30,1 |
| Amplitud | 40 | 34 | 37,7 | 32,2 |

En cuanto a los datos estimados por el modelo de interpolación se puede observar que son bastante cercanos a los datos observados. Los valores máximos y mínimos observados y pronosticados son bastante similares, si bien las medias estimadas son más bajas que las observadas y sobre todo las desviaciones típicas. Destaca la menor variabilidad de los valores pronosticados porque el objetivo de la técnica es hacer mínimo el error de la predicción (tablas 3 y 4).

3.2. El patrón espacial del NO₂ en los años 2001-2011 (red completa)

Como resultado del modelado del NO₂ y tras la reclasificación de los valores en ArcMap, se han obtenido los mapas de coropletas en dos dimensiones, donde la variable se ha agrupado en cinco intervalos para el 2001 y en tres para 2011 (figuras 5 y 6). El método de clasificación utilizado ha sido el manual, ya que permite diferenciar las zonas que están por debajo de los límites establecidos por la legislación, es decir, no superar los 40 µg/m³, de aquellas otras que se alejan de los umbrales legales.

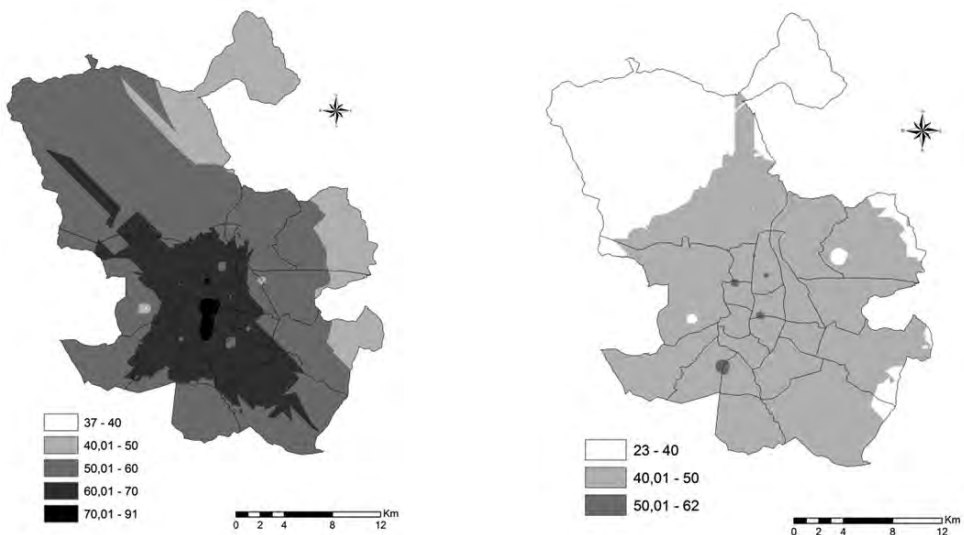
El examen del mapa de 2001 (figura 5) muestra que todo el municipio de Madrid supera el límite de los 40 µg/m³, es decir, tiene mala calidad del aire en cuanto a NO₂. El 24,4% del territorio tiene una concentración de NO₂ superior a 60 µg/m³, corresponde al Paseo de la Castellana, Glorieta de Gregorio Marañón, Cuatro Caminos, son las zonas de mayor densidad de tráfico de la ciudad. El 75,6% restante, fluctúa entre 40 y 60 µg/m³, extendiéndose de manera concéntrica en torno a la almendra central (tabla 5). Los factores que explican esta mala calidad del aire tienen que ver, por un lado, por la alta densidad de tráfico rodado en el centro urbano, y entre el centro y la periferia, donde se ubican los nuevos desarrollos urbanísticos, y por otro lado, por el tipo de arquitectura urbana, con vías estrechas y encajonadas; sin olvidar que un clima con frecuentes episodios de calma atmosférica y baja precipitación como es el de Madrid, no ayuda a la dispersión de la contaminación.

Tabla 5. Superficie ocupada por cada intervalo.

| Intervalos | 2001 | | 2011 | |
|------------|------------------------|------|------------------------|------|
| | Superficie Píxeles* | % | Superficie Píxeles* | % |
| <40 | 10 | 0,04 | 76935 | 31,8 |
| 40,01-50 | 41380 | 17,1 | 164131 | 67,9 |
| 50,01-60 | 141414 | 58,5 | 789 | 0,33 |
| 60,01-70 | 57346 | 23,7 | | |
| >70 | 1705 | 0,7 | | |
| TOTAL | 241855 | 100 | 241855 | 100 |

*1 pixel= 0,25 ha.

La situación en el año 2011 (figura 6) ha mejorado bastante, una simple ojeada muestra el predominio de los tonos blancos y grises y apenas hay color negro. El 31,8% del municipio está por debajo de límite legal de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y se debe, sobre todo, a la contribución que hacen algunas estaciones suburbanas, como, El Pardo, Juan Carlos I, Tres Olivos, Sanchinarro y Retiro. Si bien, el 67,9% (tabla 5) incumple la normativa vigente, supera el valor límite anual para la protección de la salud humana. Esto significa, que es necesario aplicar medidas más fuertes destinadas a reducir las emisiones del tráfico, principal sector emisor. Por ello, el Ayuntamiento de Madrid, está en vías de aprobar el Proyecto del Plan de Calidad del Aire de la Ciudad de Madrid 2011-2015, donde se incluyen, no sólo, medidas basadas en soluciones tecnológicas, sino que aborda aspectos de carácter estructural, como fomento de los combustibles y tecnologías menos contaminantes, disminución y restricción del vehículo privado, promover un transporte público más eficiente y sostenible, impulsar modos de movilidad alternativa, etc. (Proyecto PCA 2011-2015, p.11).

Figuras 5 y 6. Concentración atmosférica de NO_2 en Madrid en 2001 y 2011 (red completa).

3.3. El patrón espacial del NO₂ en los años 2001-2011 (estaciones comunes)

Si se analiza el mapa de 2001 (figura 7) no hay valores inferiores a 40, y todo el territorio incumpliría la legislación vigente, igual que sucedía cuando se utilizaba la red completa. El porcentaje por encima de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ baja hasta el 5,1%, consecuencia de la desaparición de algunas estaciones de tráfico del eje N- S que va desde Plaza Castilla hasta Delicias a lo largo del Paseo de la Castellana. En la mayor parte del municipio de Madrid (95,9%) las concentraciones están entre 40 y 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (tabla 6). Apenas es visible en el mapa, la superficie por encima de 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sólo representa el 0,01%.

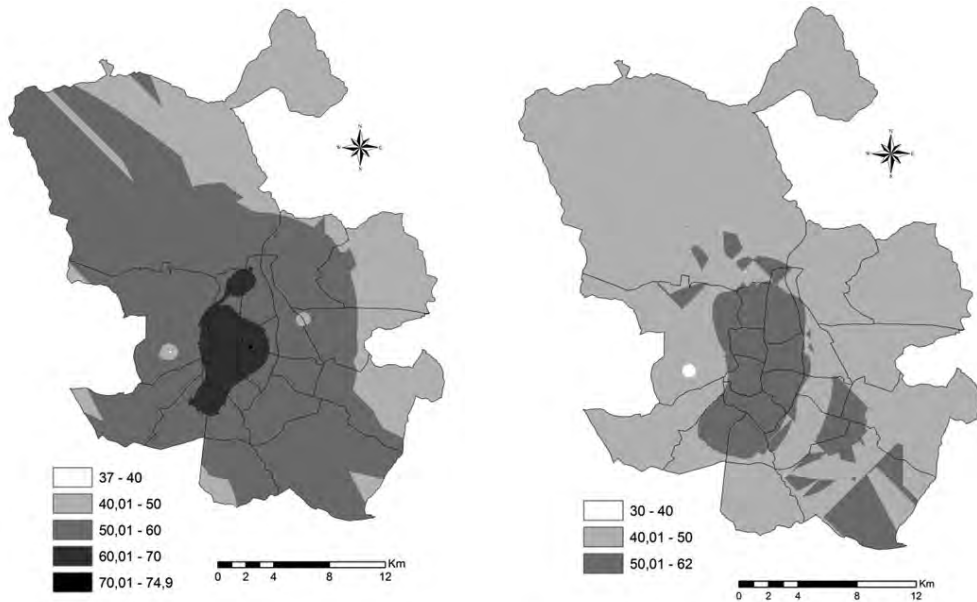
Tabla 6. Superficie ocupada por cada intervalo (estaciones comunes).

| Intervalos | 2001 | | 2011 | |
|------------|--------------------|------|--------------------|------|
| | Superficie píxeles | % | Superficie píxeles | % |
| <40 | 11 | 0,05 | 261 | 0,11 |
| 40,01-50 | 68486 | 28,3 | 198991 | 82,3 |
| 50,01-60 | 161038 | 66,6 | 42603 | 17,6 |
| 60,01-70 | 12285 | 5,08 | | |
| >70 | 35 | 0,01 | | |
| TOTAL | 241855 | 100 | 241855 | 100 |

*1 píxel = 0,25 ha.

El mapa de 2011 (figura 8) muestra un patrón espacial similar pero con valores más bajos; la calidad del aire ha mejorado con respecto a 2001, ha aumentado el número de píxeles con un valor inferior a 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (tabla 6), aunque sólo representan 0,11%, ubicados en torno a la Casa de Campo; han desaparecido los valores por encima de 60 y de 70, y el 82,3% de todo el municipio (color gris claro) está comprendido entre 40 y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Las concentraciones más altas de dióxido de nitrógeno, entre 50-60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se corresponden en el mapa con tonos de color gris oscuro, se localizan de nuevo en los distritos del centro de Madrid, con alta densidad de tráfico aunque también ocupan algunas áreas del sureste, representando, en total, 17,6% del municipio.

Figuras 7 y 8. Concentración atmosférica de NO_2 en Madrid en 2001 y 2011 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (estaciones comunes).



3.4. Análisis de las diferencias entre 2011 y 2001 para la red completa y para las estaciones comunes

Para cuantificar y visualizar las diferencias entre ambos años, se resta a la capa raster del 2011, la capa del 2001, y se obtiene una capa raster que muestra la distribución espacial de las diferencias entre ambos años.

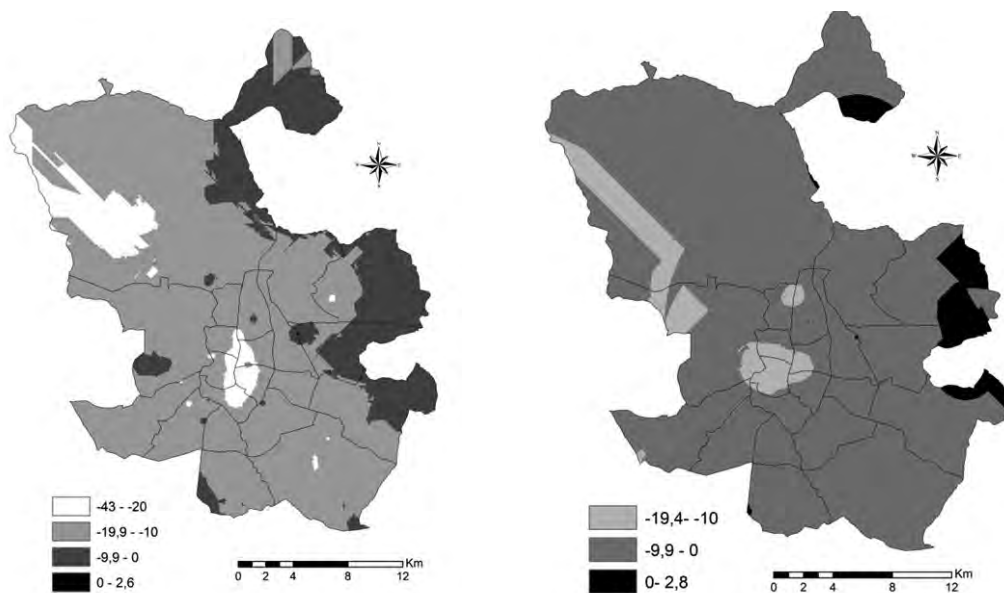
El mapa de las diferencias realizado con la red completa (figura 9) indica que hay un predominio de las diferencias negativas sobre las positivas, es decir, que el año 2011 tiene valores más bajos que el 2001. Por el contrario, las diferencias positivas advierten un aumento de la contaminación por NO_2 en 2011 respecto a 2001, aunque su reflejo sobre el mapa es imperceptible, sólo ocupan 13 píxeles. El 73% del territorio ha tenido una disminución entre -10 y $-20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la superficie entre -20 y $-43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ representa el 7% y en el 20% restante la concentración de NO_2 se ha reducido entre 0 y $-10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

El descenso medio ha sido $13,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, aunque en la zona central del municipio alcanza una reducción de $43,12 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La desviación típica es 4,4 (véase tabla 7).

Tabla 7. Estadísticos descriptivos de las capas de las diferencias entre 2001-2011.

| | Red completa | Estaciones comunes |
|-------------------|--------------|--------------------|
| MEDIA | -13,8 | -5,49 |
| DESVIACIÓN TÍPICA | 4,4 | 3,3 |
| MÁXIMO | 2,6 | 2,8 |
| MÍNIMO | -43,1 | -19,41 |
| RANGO | 45,7 | 22,2 |

Figuras 9 y 10. Diferencias entre los valores estimados del 2001 y del 2011 (red completa y estaciones comunes).



Las diferencias que se observan en la capa de las estaciones comunes, oscilan entre 2,8 y $-19,41 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La media de las diferencias es $-5,49$ y la desviación típica 2,8 (tabla 7). La disminución del NO₂ es evidente pero con valores menores que cuando se utiliza toda la red, lo que determina la menor variabilidad en los datos.

En cuanto al patrón espacial de las diferencias (figura 10), salvo una pequeña área de color negro en la zona oriental del municipio, donde la contaminación por NO₂ ha aumentado (representa 4,5% de la superficie de Madrid), en el resto, la concentración del dióxido de nitrógeno en la atmósfera ha disminuido, se corresponden con los colores grisáceos sobre el mapa (diferencias negativas). El 88,5% del territorio tiene un descenso inferior a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el 6,9% restante, el detrimento oscila entre 10 y $19,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

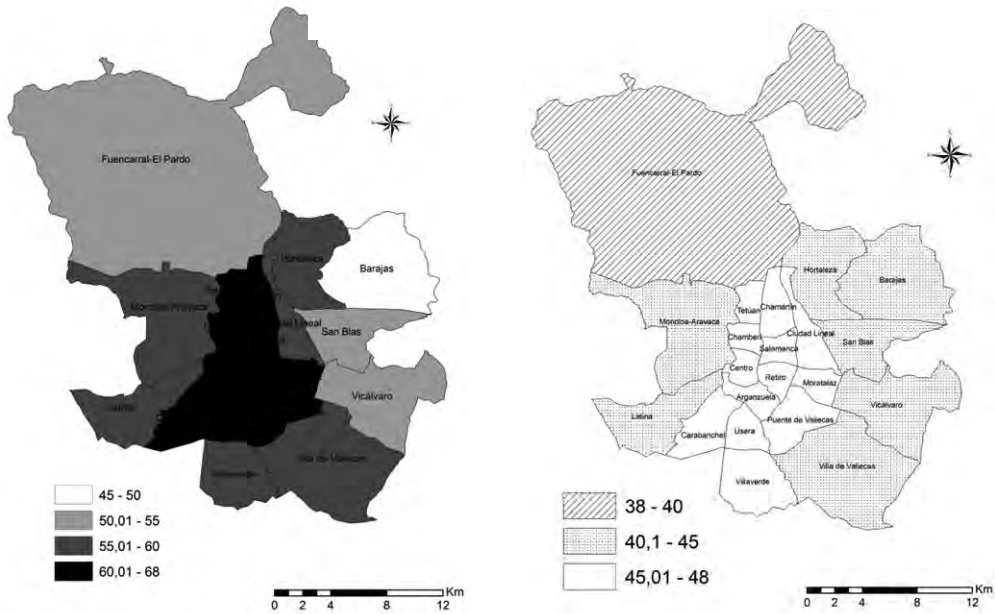
Ambas capas muestran la disminución en la contaminación por NO₂ entre 2001 y 2011. La diferencia es que cuando se utiliza la red completa el descenso afecta a toda la superficie del municipio de Madrid, y cuando se hace con la red común, hay un 4,5% del territorio en que la concentración de NO₂ aumenta. En ambos casos, las mayores disminuciones se producen en los distritos centrales, más afectados por el tráfico intenso.

3.5. Análisis de las desigualdades en las concentraciones de dióxido de nitrógeno por distritos 2001-2011 con la red completa

La concentración media de dióxido de nitrógeno por distritos en 2001 está en relación con la distribución espacial de este contaminante en ese año. Todos los distritos están por encima de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 11). La distribución de los mismos presenta una clara asimetría negativa (figura 13), hay un grupo que se sitúa en la parte más alta de la escala, con valores por encima de la media, alcanzado los $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$, son los distritos de Centro, Arganzuela, Salamanca, Chamberí,

etc. Por el contrario, los valores más bajos, por debajo de $55 \mu\text{g}/\text{m}^3$, los registran los distritos situados en la periferia, Barajas, San Blas, Vicálvaro y Fuencarral-El Pardo, que están en la cola izquierda de la distribución, donde hay una mayor dispersión de los valores, como se observa en el diagrama de caja de la figura 13. El coeficiente de variación es 4,7.

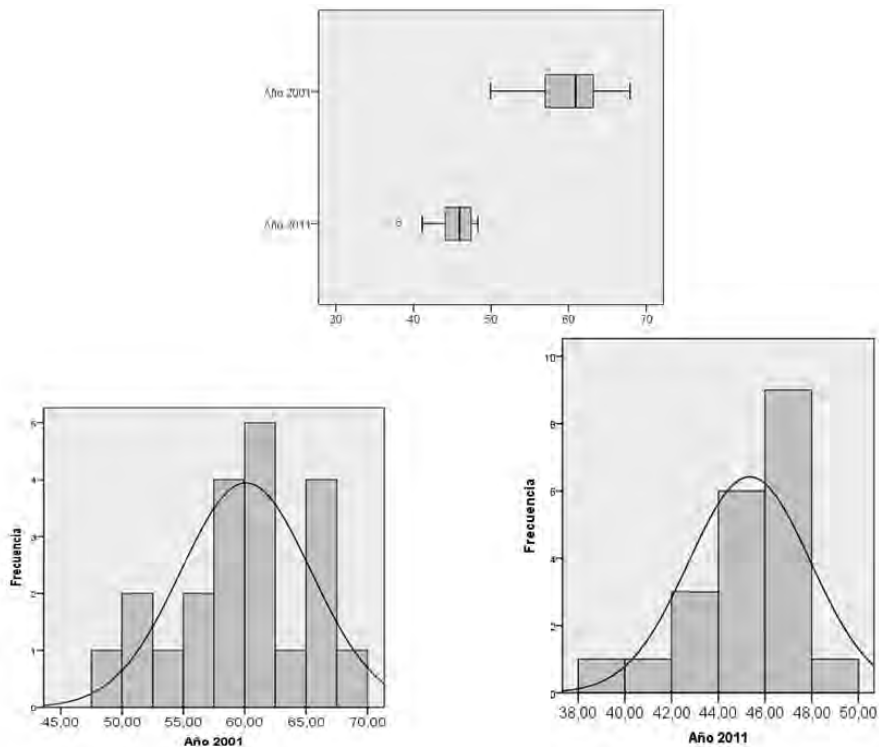
Figuras 11 y 12. Concentración media de NO_2 por distritos en 2001 y en 2011 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (red completa).



En el año 2011 el patrón de distribución espacial es diferente al de 2001. Ningún distrito tiene valores por encima de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y además Fuencarral-El Pardo cumple con el límite legal, estar por debajo de los $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De nuevo, los distritos de la zona central del municipio son los que registran peor calidad del aire (figura 12).

La distribución de los datos presenta de nuevo asimetría negativa, hay 10 distritos en los dos intervalos superiores, por encima de $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que sólo hay dos distritos en los dos intervalos inferiores, entre 38 y 42 (figura 13).

Figura 13. Distribución de los valores por distritos 2001-2011 (red completa).



El coeficiente de variación ha bajado con respecto a 2001, a 2,66. La menor variabilidad en los valores indica una disminución de las disparidades intraurbanas, que ya se había constatado en una publicación anterior (Moreno, Vinuesa y Cañada, 2011).

3.6. Análisis de las desigualdades en las concentraciones de dióxido de nitrógeno por distritos 2001-2011 con las estaciones comunes

En el año 2001 (figura 14) todos los distritos están por encima de $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la media para todo el conjunto es de $56,29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y la dispersión de los valores es alta, el coeficiente de variación es 4,3. Por encima de $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ estarían el distrito Centro, Salamanca, Retiro, Tetúan y Chamberí, de color negro sobre el mapa (figura 14). En conjunto, si observamos el diagrama de caja para 2001, la dispersión de los valores es muy superior a la de 2011, la distribución sigue siendo asimétrica, el 50% de los distritos con valores más altos están mucho más concentrados que el 50% con valores más bajos, donde Barajas y Vicalvaro se separan del resto, ocupando los dos intervalos inferiores del histograma, con valores inferiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 16).

En 2011 todos los distritos han mejorado su situación respecto al 2001 (figura 15), aunque superan el límite legal de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hay 11 distritos que están entre 45 - $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 9 entre 50 y $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La media para el conjunto ha bajado de $56,3$ a $49,3$ y el coeficiente de variación ha descendido hasta 2,5. La menor variabilidad queda reflejada en el diagrama de caja del año 2011 donde la amplitud de los valores es mucho más reducida que la del 2001 (figura 16). La distribución sigue siendo asimétrica pero menos que en 2001, el número de distritos por encima

de la media asciende a 13 y están mucho más concentrados, mientras que los 8 distritos restantes, por debajo de la media, tienen una mayor dispersión, ocupando Barajas la cola izquierda de la distribución, el intervalo más bajo, con valores por debajo de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 16).

Figuras 14 y 15. Concentración media de NO_2 por distritos 2001 y 2011 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (estaciones comunes).

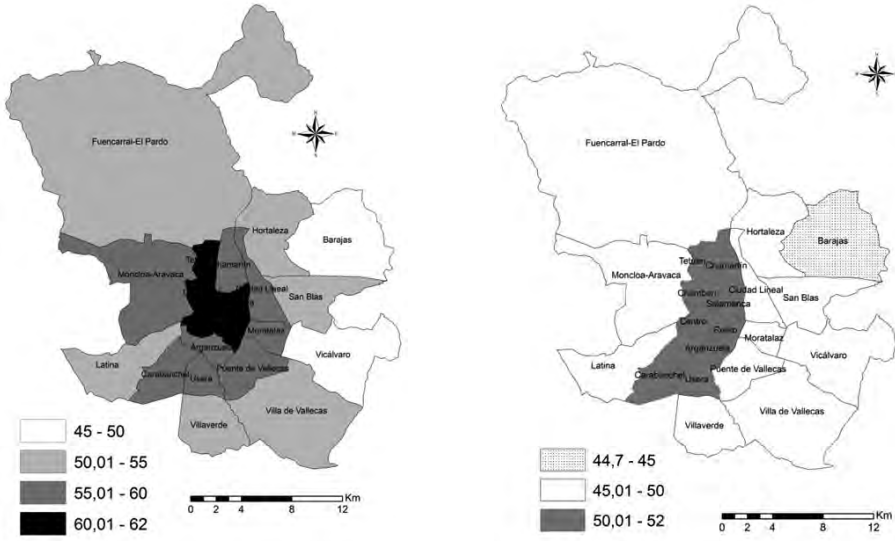
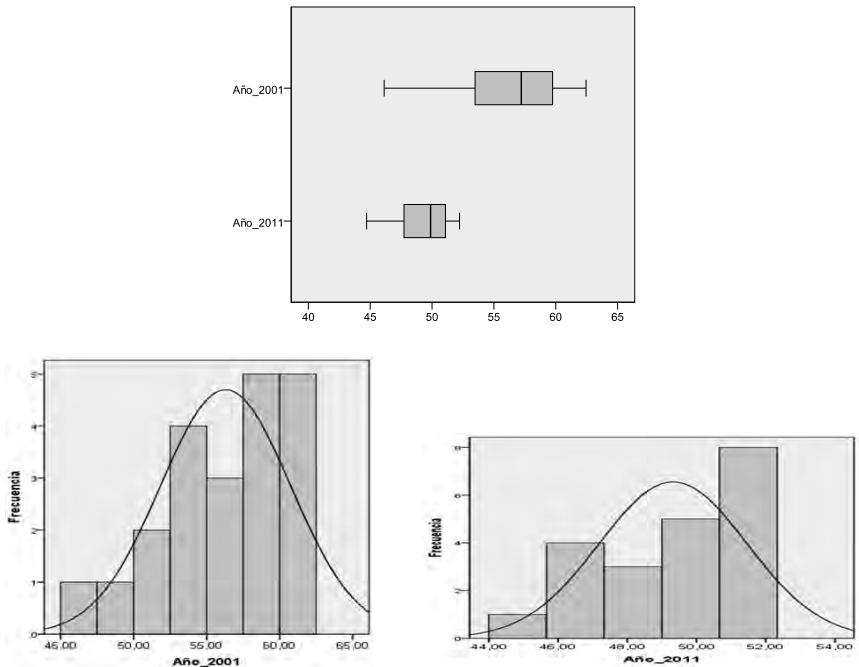


Figura 16. Distribución de los valores por distritos 2001-2011 (estaciones comunes).



4. CONCLUSIONES

Analizar los cambios temporales y espaciales experimentados por el dióxido de nitrógeno en el municipio de Madrid entre 2001 y 2011 ha sido el objetivo principal de nuestra investigación, aunque a éste, hay que unir un objetivo secundario, de carácter metodológico, que ha consistido en evaluar si el cambio en la ubicación y en la reducción del número de estaciones, ha afectado decisivamente a los resultados de los valores estimados de NO₂ mediante interpolación.

La primera conclusión es que la utilización de la red completa de cada año, o de la red de estaciones comunes, condiciona los resultados. Entre 2001 y 2011 hay una importante reducción en la concentración atmosférica de dióxido de nitrógeno, siendo mayor la diferencia cuando se utiliza la red completa que cuando se realiza sólo con las estaciones comunes de ambos periodos.

Desde el punto de vista del modelado del NO₂, ambos años presentan un patrón espacial semejante, las zonas centrales del municipio tienen mayores niveles de contaminación que las zonas periféricas. Los factores que explican esas diferencias se deben a la alta densidad de tráfico, a la arquitectura urbana de calles estrechas y encajonadas y a las características del clima de Madrid, con alta estabilidad y bajas precipitaciones que dificultan la dispersión de la contaminación.

Destaca la mayor amplitud de los valores pronosticados de NO₂ para 2001 que para 2011. Mientras que la información del 2001 se organiza en cinco intervalos la de 2011 se agrupa en tres.

El mapa de las diferencias refleja el predominio de las diferencias negativas (descenso) frente a las positivas (aumento). La bajada afecta al 100% de la superficie de Madrid cuando se tiene en cuenta toda la red, y al 92% cuando se opera con las estaciones comunes.

El análisis de las desigualdades en las concentraciones de dióxido de nitrógeno por distritos revela la mejoría de la calidad del aire por NO₂ de 2001 a 2011 y la disminución de las disparidades entre distritos. No obstante los distritos centrales presentan peor situación que los periféricos. En todos los casos la distribución es asimétrica, se concentran un mayor número de distritos en los intervalos altos y en los intervalos inferiores la dispersión es mayor.

De nuevo los resultados varían en función de la red utilizada. Sirva como ejemplo el año 2011; si se utiliza la red completa, la mejoría es generalizada en todos los distritos, incluso Fuencarral-El Pardo estaría por debajo del límite legal de 40 µg/m³, pero si se utilizan sólo las estaciones comunes, la calidad ambiental baja bastante, no sólo no hay ningún distrito inferior a 40 µg/m³, sino que hay un empeoramiento de todos los demás, y, sobre todo, de los distritos centrales que estarían en el intervalo por encima de 50 mientras que con la red completa no sobrepasarían ese valor.

Como conclusión general es que hay que seguir aplicando políticas de reducción de la contaminación que contribuyan a mejorar la calidad del aire en la ciudad de Madrid, no sólo, porque haya que cumplir con la legislación, sino por problemas de salud pública.

5. BIBLIOGRAFÍA

- CAÑADATORRECILLA, R. (2004a): "Modelado de la variabilidad espacial del ozono en la Comunidad de Madrid", en *Clima y Cartografía: Representación gráfica y modelización como base de la investigación climática*. Grupo de climatología de la Asociación de Geógrafos Españoles, Universidad de Valladolid. pp. 107-109.

- CAÑADA TORRECILLA, R. (2004b): “Aplicación de la geoestadística al estudio de la variabilidad espacial del ozono en la Comunidad de Madrid”, en *El clima entre el mar y la montaña*, AEC, Universidad de Cantabria, pp. 451-462.
- CAÑADA TORRECILLA, R. (2007): “Análisis Geoestadístico” en Moreno, A. (Coord.): *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*, Ra-Ma Editorial, pp. 752-880.
- CAÑADA, R., VIDAL, M.J. y MORENO, A. (2011): “Interpolación espacial y visualización cartográfica para el análisis de la justicia ambiental: ensayo metodológico sobre la contaminación por partículas atmosféricas en Madrid”, *Geofocus*, pp. 118-154.
- KRIVORUCHKO, K. (2011): *Spatial Statistical Data Analysis for GIS Users (DVD-ROM)*, Esri Press.
- MORENO, A. y CAÑADA, R. (2007): “Justicia Ambiental y contaminación atmosférica por dióxido de azufre en Madrid: análisis espacio temporal y valoración con sistemas de información geográfica”, *Boletín de la AGE*, 44, pp. 301-324. <http://www.boletinage.com/44/14-moreno.pdf>
- MORENO, A., VINUESA, J. y CAÑADA, R. (2011): Los desequilibrios y reequilibrios intraurbanos en Madrid: diagnóstico 2011, *Barómetro de Economía de la ciudad de Madrid*, pp. 31-168.
<http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCObservEconomico/BarometroEconomia/2010/Ficheros/Abril/ficheros/3.%20Equilibrio%20territorial.pdf>
- PLAN NACIONAL DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE, PNMCA, 2011. 189 p.
http://www.magrama.gob.es/imagenes/es/pnmca_tcm7-181205.pdf
- PLAN DE MEJORA DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL AYUNTAMIENTO DE MADRID 2011-2015, 289 p. <http://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/Agenda21/ContenidosBasicosag/Ficheros/PCA-20-04-2012.pdf>
- VIDAL, M.J., MORENO, A. y CAÑADA, R. (2011): “Geovisualización avanzada para la exploración de patrones y relaciones socio-ambientales con SIG: aplicación a la ciudad de Madrid”, Ponencia presentada a la *XII Conferencia Iberoamericana de SIG*, Toluca (México), 25 al 27 de Mayo, 28 pp. http://www.inegi.org.mx/eventos/2011/conf_iberodoc/ET1_13_VIDAL.pdf