



**POLITÉCNICA**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS INDUSTRIALES

# **EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL PLAN DE CALIDAD DEL AIRE Y CAMBIO CLIMÁTICO DE LA CIUDAD DE MADRID**

**Septiembre 2017**



**POLITÉCNICA**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS INDUSTRIALES

## ÍNDICE

<b>1. Objetivo .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Introducción .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Metodología .....</b>	<b>5</b>
<b>4. Resultados .....</b>	<b>6</b>
<b>4.1. Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).....</b>	<b>7</b>
<b>4.1.1. Media anual .....</b>	<b>7</b>
<b>4.1.2. Percentil horario 99,8 .....</b>	<b>9</b>
<b>4.2. Partículas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>).....</b>	<b>11</b>
<b>4.2.1. Media anual de PM<sub>10</sub> .....</b>	<b>11</b>
<b>4.2.2. Percentil diario (PM<sub>10</sub>) .....</b>	<b>13</b>
<b>4.2.3. Media anual (PM<sub>2.5</sub>) .....</b>	<b>15</b>
<b>5. Variación de concentración en las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire y reflexiones sobre el cumplimiento futuro de los valores límite .....</b>	<b>17</b>
<b>6. Resumen y conclusiones.....</b>	<b>20</b>



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Comparación de los valores límite establecidos por el Real Decreto 102/2011 para la protección de la salud humana (a partir de 2020) y los valores guía definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).....	4
<b>Tabla 2.</b> Medias y variación de las concentraciones anuales medias de NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> antes y después de la aplicación del Plan A por tipo de ubicación.....	19
<b>Tabla 3.</b> Resumen de la reducción de la concentración en los valores límite de NO <sub>2</sub> , PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en tres áreas geográfica:, Municipio Madrid en su conjunto, interior de la Calle-30 y el Área central de cero emisiones definido en el Plan A. ....	21

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Dominio de simulación utilizado para la evaluación del Plan A y ubicación de las estaciones de medición de la calidad del aire que forman parte de la Red de Vigilancia del Ayuntamiento de Madrid.....	6
<b>Figura 2.</b> Concentración media anual de NO <sub>2</sub> predicha para el año Base (izquierda) y 2020 (derecha) .....	8
<b>Figura 3.</b> Reducción de la media anual de NO <sub>2</sub> asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del escenario Base) .....	9
<b>Figura 4.</b> Percentil 99,8 de NO <sub>2</sub> de la serie anual predicha para el año Base (izquierda) y 2020 (derecha).....	10
<b>Figura 5.</b> Reducción del percentil horario 99,8 de NO <sub>2</sub> (19º valor anual más alto) asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles de del escenario Base).....	11
<b>Figura 6.</b> Concentración media anual de PM <sub>10</sub> predicha para el escenario Base (izquierda) y 2020 (derecha) .....	12
<b>Figura 7.</b> Reducción de la media anual de PM <sub>10</sub> asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del escenario Base) –los valores negativos indican incrementos de concentración- .....	13
<b>Figura 8.</b> Percentil diario 90,4 de la serie anual de PM <sub>10</sub> predicha para el año Base (izquierda) y 2020 (derecha) .....	14
<b>Figura 9.</b> Reducción del percentil diario 90,4 de PM <sub>10</sub> asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del año Base) –los valores negativos indican incrementos de concentración- .....	15
<b>Figura 10.</b> Media anual de PM <sub>2.5</sub> predicha para el año base (izquierda) y 2020 (derecha) .....	16
<b>Figura 11.</b> Reducción de la media anual de PM <sub>2,5</sub> asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del año base) –los valores negativos indican incrementos de concentración- .....	16
<b>Figura 12.</b> Ilustración de los gradientes espaciales de concentración de NO <sub>2</sub> en zonas de tráfico en comparación con la resolución horizontal del modelo de mesoescala.....	18



## 1. Objetivo

El objetivo de este trabajo es el de presentar la cuantificación del efecto de las medidas de reducción de emisiones definidas en del Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid (Plan A) del Ayuntamiento de Madrid en términos de calidad del aire, con el propósito de estimar la mejora de la calidad del aire en la ciudad y evaluar el cumplimiento de los valores límites de concentración para los distintos contaminantes establecidos por el RD 102/2011 en el año 2020, horizonte temporal definido a tal efecto.

## 2. Introducción

Además de la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI, 2020-2030) en consonancia al Acuerdo de París celebrado en diciembre de 2015 y los compromisos adquiridos en el contexto del Pacto de Alcaldes para el Clima y la Energía, el objetivo del Plan A es el de mejorar la calidad del aire en la ciudad de modo que en 2020 sea posible acercarse al cumplimiento de los valores guía de concentración definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) tanto para el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) como para partículas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>). Según se muestra en la **Tabla 1**, estos valores coinciden con los determinados por el Real Decreto 102/2011, de obligado cumplimiento en todas las ciudades de los estados miembros de la Unión Europea, para el NO<sub>2</sub>, pero son mucho más restrictivos en lo que respecta al material particulado.

**Tabla 1.** Comparación de los valores límite establecidos por el Real Decreto 102/2011 para la protección de la salud humana (a partir de 2020) y los valores guía definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS)

Periodo de promedio	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )		PM <sub>2,5</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	
	R.D 102/2011	OMS	R.D 102/2011	OMS	R.D 102/2011	OMS
Media horaria	200	200	-	-	-	-
Media anual	40	40	40	20	20	10
Media 24 h		-	50	50	-	25



POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS INDUSTRIALES

Para el cumplimiento de estos objetivos el horizonte temporal considerado (2020), el Plan A incluye un total de 30 medidas que afectan mayoritariamente a dos sectores, el sector tráfico (Programa de movilidad sostenible) y el sector residencial, comercial e institucional (RCI) (Programa de regeneración urbana), de forma consecuente con el estudio de contribución de fuentes realizado con anterioridad. La estimación realizada sobre el efecto de las medidas incluidas en el Plan A indica que se podrían reducir del orden de 3000 t de NO<sub>x</sub>, 220 t de PM<sub>2,5</sub> y cerca de 200 kt de CO<sub>2</sub> equivalente (en base anual), lo que supone una reducción global próxima al 20%, 23% y 3%, respectivamente (respecto a las emisiones de 2012, utilizado como año base). Estas reducciones constituyen un compromiso razonable entre un objetivo ambicioso pero viable a corto plazo (horizonte 2020); no obstante, es preciso estimar cual sería el efecto esperable en lo que atañe a la concentración en el aire ambiente de las principales sustancias relevantes para la calidad del aire. Para ello, se ha aplicado un sistema de simulación atmosférica de tipo euleriano de última generación que permite localizar los cambios cuantitativos y cualitativos de las emisiones y su evolución en la atmósfera a mesoescala teniendo en cuenta los principales procesos de transporte y transformación de contaminantes. Esta evaluación, además de orientar sobre las posibilidades de cumplimiento de los objetivos planteados en términos de calidad del aire, también constituirá la base de posteriores valoraciones sobre impactos en salud.

### 3. Metodología

Una vez evaluada la reducción de emisiones de las distintas medidas recogidas en el Plan A en base a las metodologías más adecuadas para cada sector, se ha procedido a analizar el efecto conjunto de todas ellas con un horizonte temporal 2020. Para ello, se ha utilizado un modelo de simulación de la calidad del aire que permite obtener las concentraciones de los distintos contaminantes en función de las variaciones de emisión asumidas. De este modo, y mediante su comparación con la simulación realizada para el año 2012, utilizado como año de referencia, es posible estimar el efecto del conjunto de las medidas propuestas en el Plan A. A este año o situación de referencia se le denominará escenario Base en lo sucesivo. El sistema es el mismo que el utilizado para el análisis de contribución de fuentes previo y se ha utilizado en numerosas ocasiones por el Ayuntamiento de Madrid para la evaluación del impacto de diversas medidas y planes. El sistema se describe con detalle en el **Anexo I**.

El dominio de simulación (**Figura 1**) utilizado para la evaluación del Plan A tiene una resolución horizontal de 1 km<sup>2</sup> y unas dimensiones de 40 km en dirección E-O y 44 km, dirección N-S, suficiente



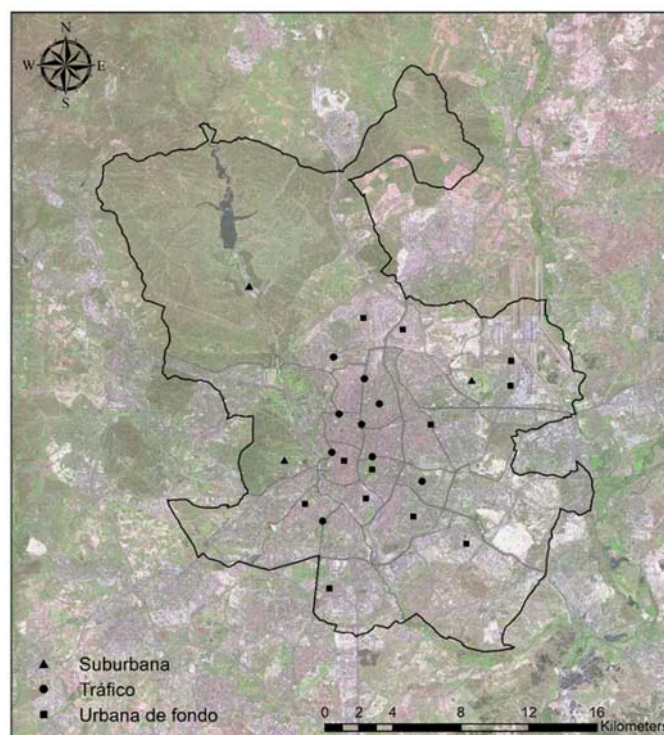


POLITÉCNICA



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS INDUSTRIALES

para contener la totalidad del municipio de Madrid y dar una visión general del Plan a nivel del conjunto urbano. Debido a la irregularidad geométrica de la frontera administrativa del municipio, el dominio engloba la superficie de municipios aledaños, de modo que cubre la práctica totalidad del área metropolitana de Madrid que incluye la capital y una serie de núcleos aledaños con los que conforma un continuo urbano.



**Figura 1.** Dominio de simulación utilizado para la evaluación del Plan A y ubicación de las estaciones de medición de la calidad del aire que forman parte de la Red de Vigilancia del Ayuntamiento de Madrid

#### 4. Resultados

Todos los resultados mostrados en este apartado se corresponden con las predicciones del sistema de modelización para el dominio representado en la **Figura 1** (corresponde con el dominio de máxima resolución de un configuración de 4 dominios anidados, según se expone en el **Anexo I**). Este apartado resume los resultados y se estructura en dos grandes bloques. Por un lado, se presentan los niveles de concentración relativos al dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), el cual incluye dos índices relevantes según la legislación vigente. En primer lugar, se estudia el efecto previsible sobre la media anual, que no debe exceder los  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para la protección de la salud humana. A continuación se muestran los



resultados para el percentil 99,8 de la serie anual de concentraciones horarias (19º valor más alto), que no debe superar los 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y posteriormente, resultados para las partículas en suspensión. En concreto, se analiza la variación en la concentración media anual de  $\text{PM}_{10}$  y de  $\text{PM}_{2.5}$ , que supone el indicador más relevante para la protección de la salud humana. Desde el punto de vista legal, los valores límite para la protección de la salud humana son de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente (a partir de 2020). En el caso del  $\text{PM}_{10}$  también existe un valor límite diario, donde se permite hasta 35 superaciones en un año civil. Para ello se analizan los resultados obtenidos para el percentil 90,4 de la serie anual. En todos los casos se muestran las diferencias entre los dos escenarios (base– 2020) en términos relativos con el objetivo de analizar los patrones espaciales de las diferencias y así localizar en qué lugar del dominio son más efectivas las medidas adoptadas por el Plan.

Este tipo de análisis es más relevante que el de los valores absolutos, ya que es más fácil de relacionar con las variaciones en términos relevantes y permite reducir el impacto de las imprecisiones y limitaciones del sistema de simulación. Dicho sistema constituye una herramienta óptima para reevaluar las interacciones entre todas las fuentes ya ámbitos geográficos y así proporcionar una visión general de la concentración a nivel de ciudad. Es decir, es una aproximación que esencialmente permite evaluar la variación de concentración de fondo urbano. Por lo tanto, no es posible predecir la concentración en puntos muy concretos, especialmente en ubicaciones muy cercanas a las emisiones directas del tráfico. Aun así, se incluye un epígrafe donde se analiza la variación esperable en los puntos donde se localizan las estaciones y se hace una reflexión sobre el posible cumplimiento de los valores legales en 2020 en base a los resultados obtenidos e información relevante generada en otros proyectos de investigación para la ciudad de Madrid.

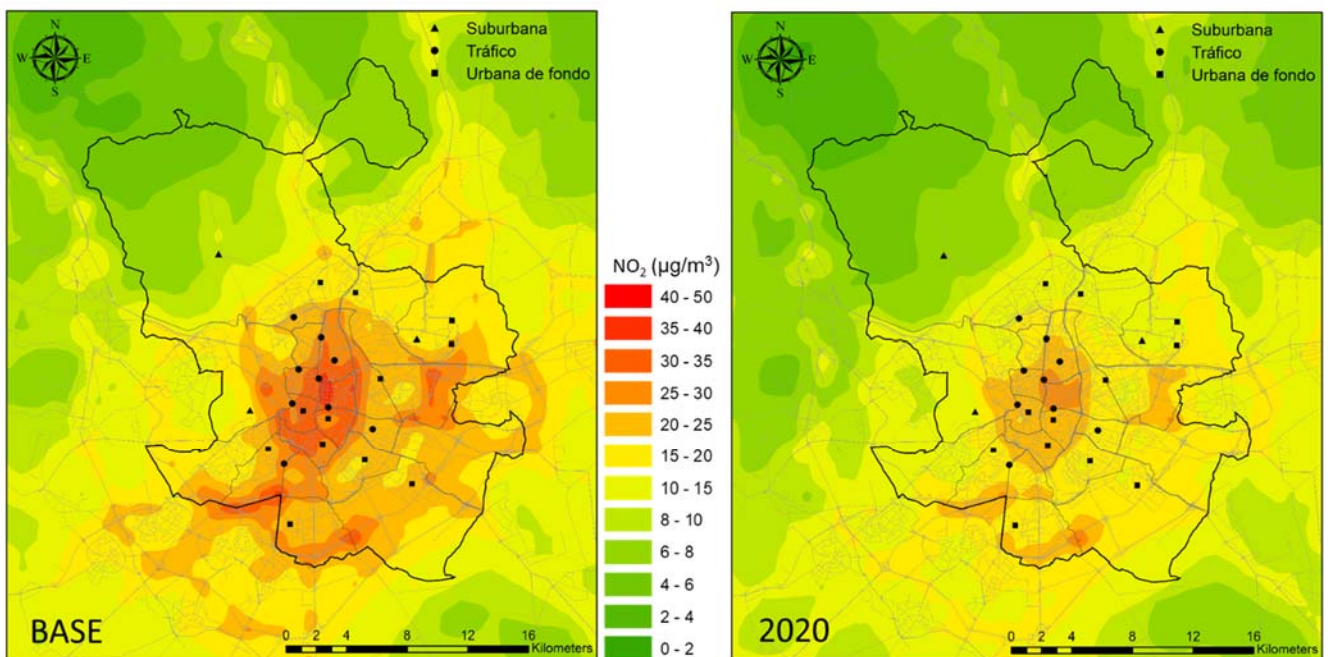
## 4.1. Dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )

### 4.1.1. Media anual

Los resultados de la simulación pronostican un claro descenso de los niveles de concentración de  $\text{NO}_2$  en 2020 para todo el dominio y más concretamente para el municipio de Madrid, como consecuencia de las reducciones consideradas para el año 2020 (aproximadamente un 20%).

En la **Figura 2** se muestran los valores correspondientes a la media anual (parámetro más restrictivo en relación al cumplimiento de los valores límite establecidos legalmente y coincidente con el valor guía definido por la OMS) para el año base, utilizado como año de referencia, y el año 2020,

horizonte temporal del escenario futuro simulado. Examinando los patrones espaciales de ambos mapas, se observa que los niveles de concentración de  $\text{NO}_2$  están dominados principalmente por el tráfico rodado, localizándose los valores más altos en el centro de la ciudad, llegando a los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el área cercana al Paseo de la Castellana.

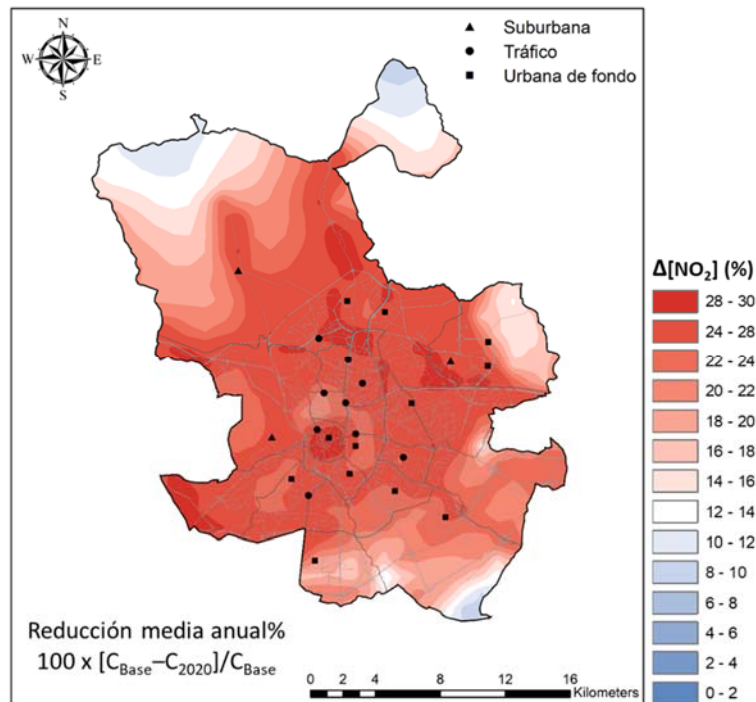


**Figura 2.** Concentración media anual de  $\text{NO}_2$  predicha para el año Base (izquierda) y 2020 (derecha)

La media anual de concentración de  $\text{NO}_2$  correspondiente al área total del municipio de Madrid pasaría de  $17,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el año base a  $13,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2020, lo que supone un descenso del 23%, ligeramente superior al de reducción de emisiones de  $\text{NO}_x$  (en las que también se reduce la ratio  $\text{NO}_2$  primario).

En la **Figura 3** se muestra la diferencia relativa entre ambos escenarios con una reducción máxima de los niveles de concentración en el centro de la ciudad, concretamente en el área central de cero emisiones que llegaría a ser de hasta el 31%, lo que en términos absolutos equivale a reducciones de  $\text{NO}_2$  en torno a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Además, existen otras zonas del Municipio de Madrid en las que también se predicen reducciones importantes, relacionadas principalmente con las actuaciones sobre el sector transporte. Estas zonas son el norte de la Calle 30 o alguna sección de la autopista M-40, donde se alcanzan reducciones de entre el 25-30%.





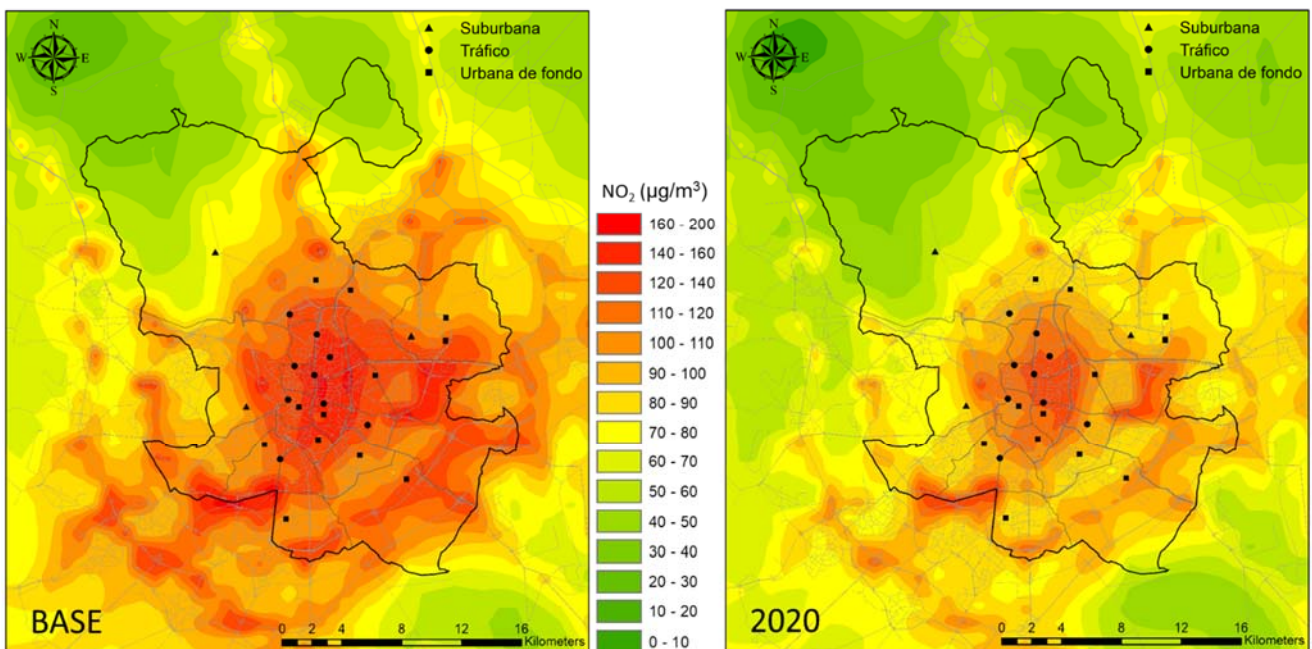
**Figura 3.** Reducción de la media anual de NO<sub>2</sub> asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del escenario Base)

Las zonas con menor variación se sitúan en la región noroeste del municipio (distrito Fuencarral-El Pardo) donde la emisión de los distintos sectores es muy baja en ambos escenarios, no obstante, la concentración disminuye en 2020 hasta en un 8%. La otra zona se localiza en el sudeste, próximo a la ubicación del Parque Tecnológico de Valdemingómez, donde las emisiones de NO<sub>x</sub> incluso aumentan ligeramente en 2020 (≈0,6%), pero no lo suficiente como para los niveles de concentración sean mayores en 2020 que en el año base. Esta circunstancia es debida principalmente a que otros sectores más influyentes (tráfico) reducen sus emisiones en mayor grado y dominan el efecto global en la zona. Como se discute más adelante, en el caso de las partículas un aumento de las emisiones en 2020 sí podría traducirse en un ligero aumento de la concentración en el entorno de la instalación.

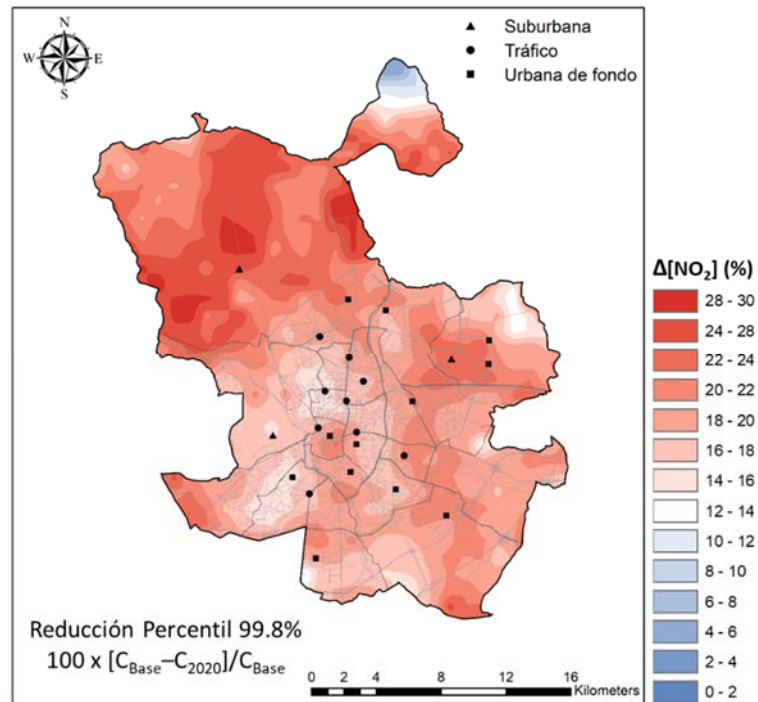
#### 4.1.2. Percentil horario 99,8

La evolución de los picos de concentración se puede evaluar a través del análisis de la variación pronosticada para el percentil 99,8 de la serie anual (indicador utilizado para definir el valor límite horario en el RD 102/2011).

Los patrones espaciales correspondientes al percentil 99,8 están marcados mayoritariamente por la influencia del tráfico rodado. Estos máximos se dan en las vías e intersección de vías más importantes, donde las emisiones procedentes del tráfico son especialmente importantes. Por ejemplo, en el eje de la Castellana se alcanzan valores hasta  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el año base y 2020 respectivamente. En la **Figura 4** se muestran las simulaciones realizadas para ambos años. De forma análoga a la media anual, se produce un descenso generalizado, que como media para el conjunto del dominio alcanza un 18%. En el municipio esta reducción relativa es ligeramente superior, con diferencias máximas de hasta  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en términos absolutos. En la **Figura 5**, se muestra la variación relativa de ambos escenarios en donde se observa que las máximas reducciones se dan en la zona Fuencarral-El Pardo, con una disminución de los niveles de concentración del 30 % aproximadamente, aun siendo muy moderadas en términos absolutos.



**Figura 4.** Percentil 99,8 de  $\text{NO}_2$  de la serie anual predicha para el año Base (izquierda) y 2020 (derecha)



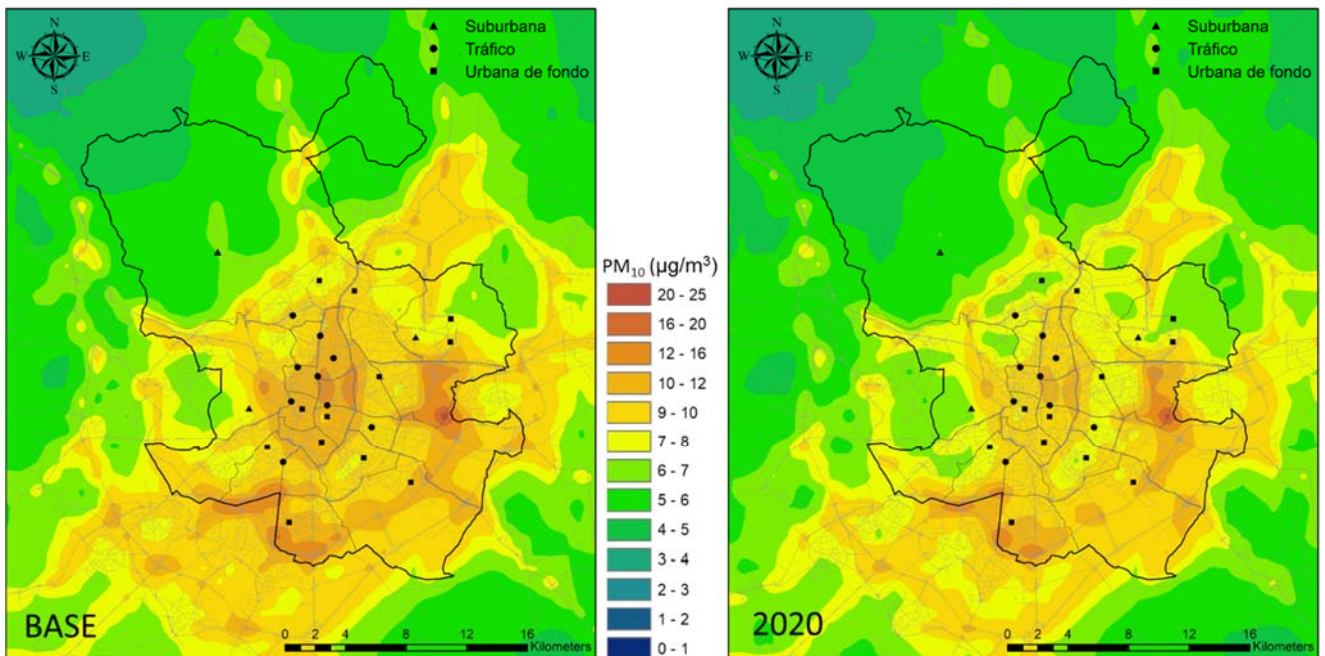
**Figura 5.** Reducción del percentil horario 99,8 de NO<sub>2</sub> (19<sup>o</sup> valor anual más alto) asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles de del escenario Base)

## 4.2. Partículas (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>)

### 4.2.1. Media anual de PM<sub>10</sub>

Este es el indicador utilizado para definir el valor límite anual de concentración de partículas en suspensión (PM<sub>10</sub>), establecido concretamente en 40 µg/m<sup>3</sup>. En la **Figura 6** se muestran los resultados de la simulación para el año base y la simulación que pronostica las distintas y políticas y medidas implementadas en el escenario de emisiones a 2020, que arrojan concentraciones muy inferiores. Pese a que efectivamente, no existió ninguna superación del valor límite en el año de referencia, estos resultados están influidos por las limitaciones del modelo asociadas a las partículas gruesas específicamente, según se comenta en el capítulo de análisis de contribución de fuentes. Por este motivo, la variación en términos relativos mostrada en la **Figura 7** es más ilustrativa en este caso.

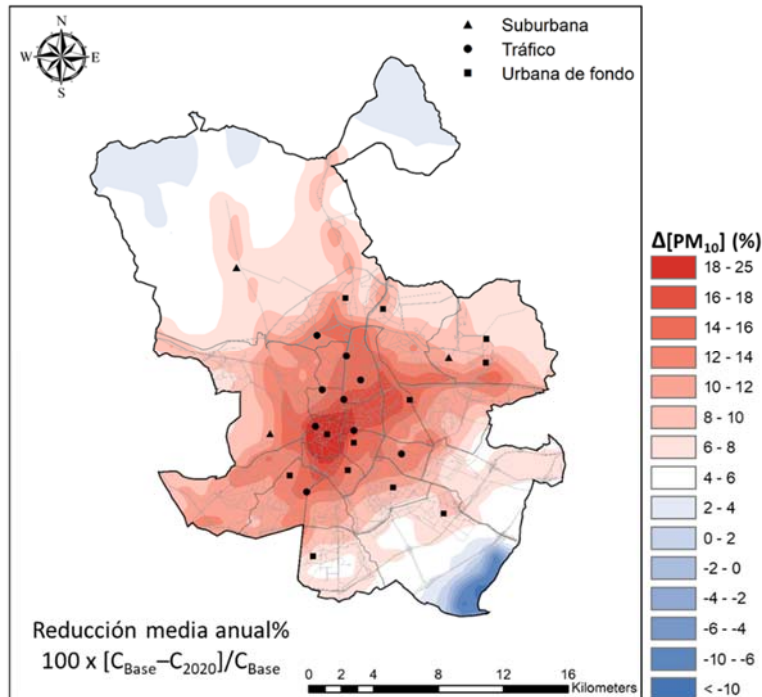




**Figura 6.** Concentración media anual de  $PM_{10}$  predicha para el escenario Base (izquierda) y 2020 (derecha)

Una vez más existe una clara relación entre los máximos de concentración y las emisiones procedentes del tráfico rodado; tanto en el año base como en 2020 el patrón espacial es prácticamente el mismo siendo los valores máximos absolutos inferiores a  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en ambos casos. Se observa en general un descenso de los niveles de concentración de  $PM_{10}$ , especialmente en el centro del dominio en el área denominada “área central de cero emisiones”, definida en el Plan A. En esta zona las reducciones alcanzan hasta el 24%, lo que implica reducciones de hasta  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En el resto del municipio la reducción media es del 8%, lo que en términos absolutos equivale a  $0,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Cabe destacar que, en la zona sur del municipio, donde se ubica el Parque Tecnológico de Valdemingómez, se produce un aumento de los niveles de concentración de partículas, que pueden ser de hasta un 10% superiores a los niveles del escenario de referencia (**Figura 7**) (lo que representa un aumento inferior a  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Esto es debido a que las emisiones en el sector SNAP 09, gestión de residuos, aumentan debido a un incremento en la combustión de biogás con objeto de incrementar el aprovechamiento energético de los residuos municipales. Sin embargo, el impacto global de la medida (que implica un ahorro en la importación de energía eléctrica) tiene un balance positivo.

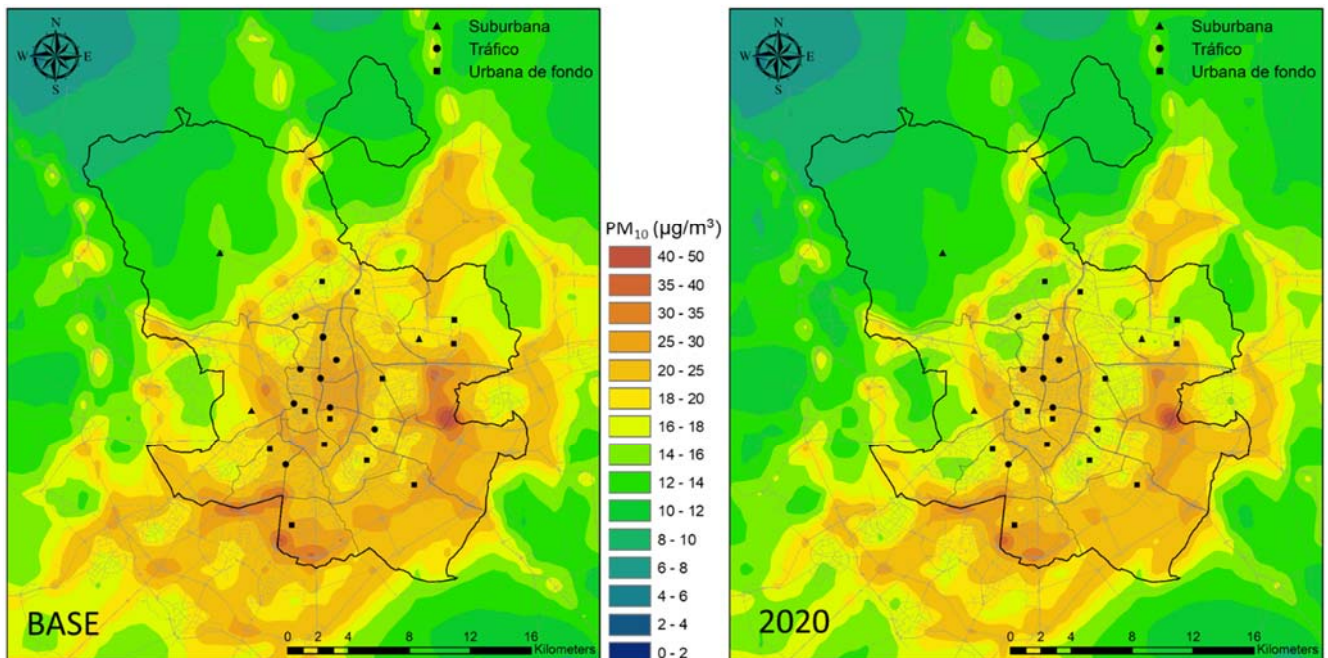


**Figura 7.** Reducción de la media anual de  $PM_{10}$  asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del escenario Base) –los valores negativos indican incrementos de concentración–

#### 4.2.2. Percentil diario ( $PM_{10}$ )

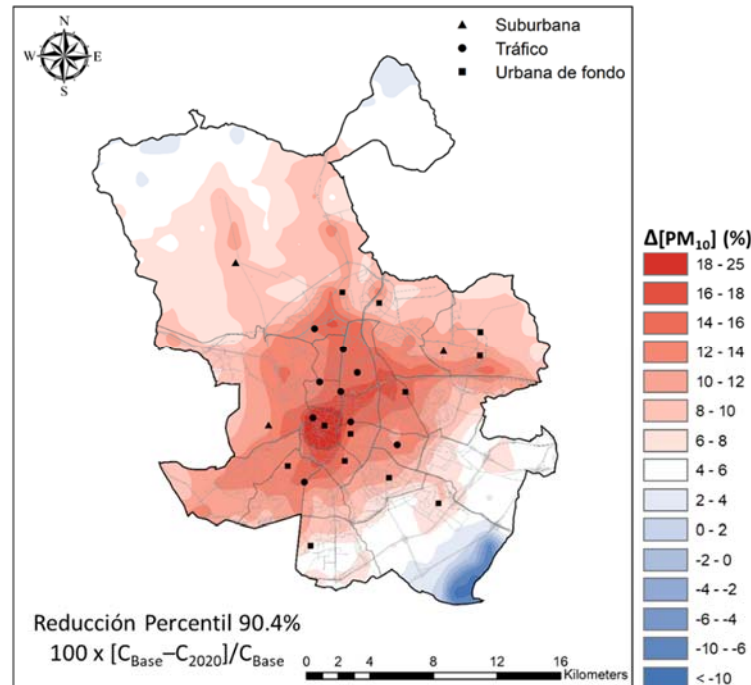
Para estudiar los niveles de inmisión de  $PM_{10}$ , en este apartado se analiza el otro índice propuesto por la legislación en materia de calidad del aire; el valor límite diario de  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , del cual tan solo se permiten 35 superaciones en un año civil. Para ello en la **Figura 8** se muestra el trigésimo sexto promedio diario más alto, es decir el percentil diario 90,4 de la serie anual. En ambos escenarios (base y 2020) se observa un patrón espacial en donde los niveles de concentración están claramente influenciados por el tráfico rodado y en menor medida por el sector RCI. Además, se observa un claro descenso de estos niveles gracias a las medidas del Plan A, que consiguen reducir este valor para el conjunto del municipio alrededor de un 9% (cerca de  $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en términos absolutos).





**Figura 8.** Percentil diario 90,4 de la serie anual de  $PM_{10}$  predicha para el año Base (izquierda) y 2020 (derecha)

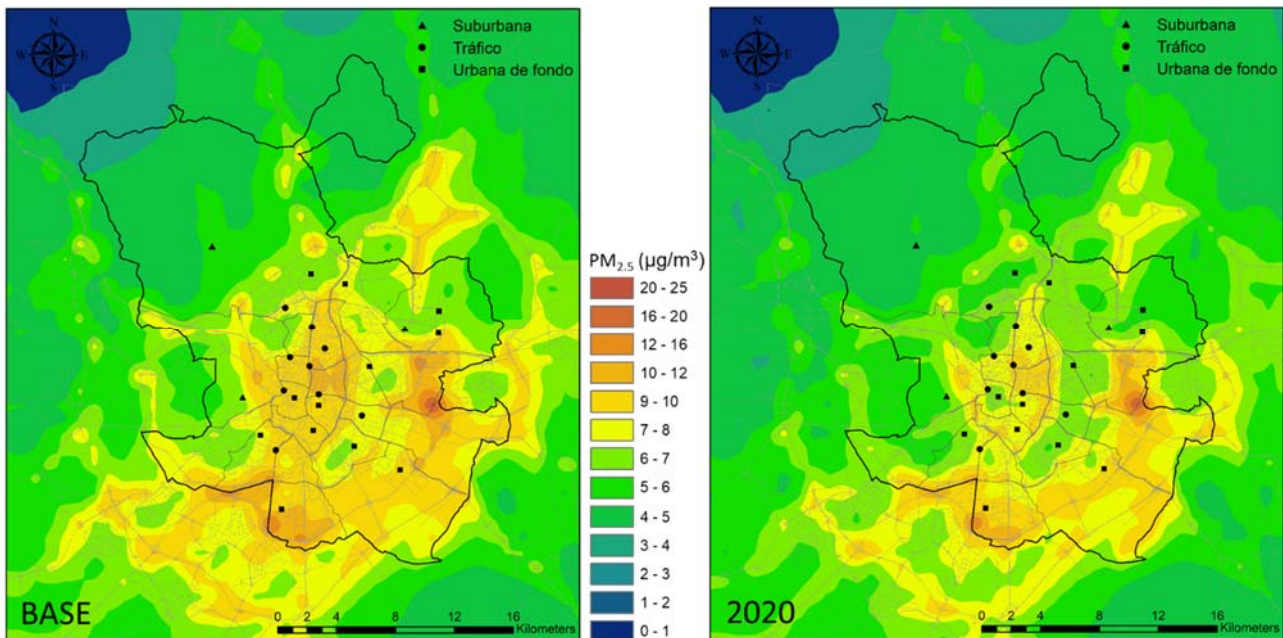
En la **Figura 9** se muestra la diferencia en el percentil 90,4 de ambas simulaciones en relación a los niveles del año base. Se observa que los patrones espaciales son idénticos a las medias, con una máxima reducción en el centro urbano, donde el “área de cero emisiones” tiene una mayor influencia. Esta reducción máxima alcanza un 20%, lo que equivale a  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en términos absolutos. Igualmente, en la zona sur se nota el efecto del aumento de las emisiones de partículas en el Parque Tecnológico de Valdemingómez, en donde el percentil 90,4 podría incrementarse hasta en un 11%, en torno a  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2020, en cualquier caso, lejos de los valores límite definidos en la legislación.



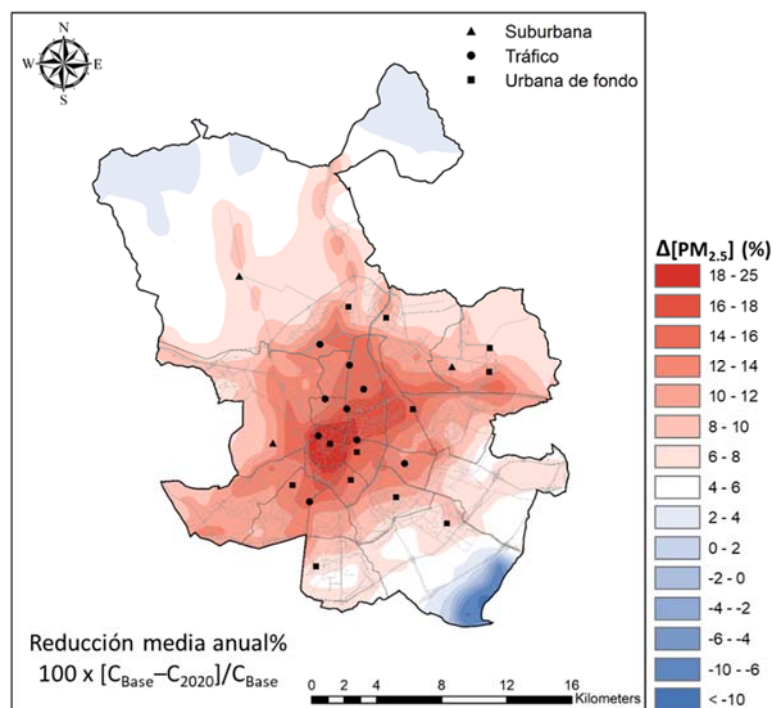
**Figura 9.** Reducción del percentil diario 90,4 de  $PM_{10}$  asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del año Base) –los valores negativos indican incrementos de concentración–

#### 4.2.3. Media anual ( $PM_{2.5}$ )

Las partículas finas (diámetro < 2,5  $\mu\text{m}$ ) son un contaminante muy importante por su repercusión negativa para salud humana. La **Figura 10** muestra los mapas de concentración media anual para ambos escenarios según las simulaciones realizadas. El valor límite legal establecido para este contaminante en 2020 es de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En general, los valores obtenidos son muy inferiores. El promedio anual de concentración de  $PM_{2.5}$  correspondiente al área total del Municipio de Madrid pasaría de 7,0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a 6,3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2020, lo que supone un descenso del 9% como media. Exceptuando algunos puntos bajo la influencia directa de emisiones de tipo puntual, con carácter general los máximos de concentración se localizan sobre las principales vías de comunicación, con concentraciones en algunos puntos muy próximas a los valores límite de concentración legalmente establecidos y claramente por encima de los valores guía de la OMS. Las zonas con mayores reducciones se localizan en el área definida como cero emisiones, con reducciones de hasta el 20% (**Figura 11**), que aproximadamente 2,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en términos absolutos.



**Figura 10.** Media anual de PM<sub>2.5</sub> predicha para el año base (izquierda) y 2020 (derecha)



**Figura 11.** Reducción de la media anual de PM<sub>2.5</sub> asociada a la implementación respecto al Plan A (respecto a niveles del año base) –los valores negativos indican incrementos de concentración–





**POLITÉCNICA**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIEROS INDUSTRIALES

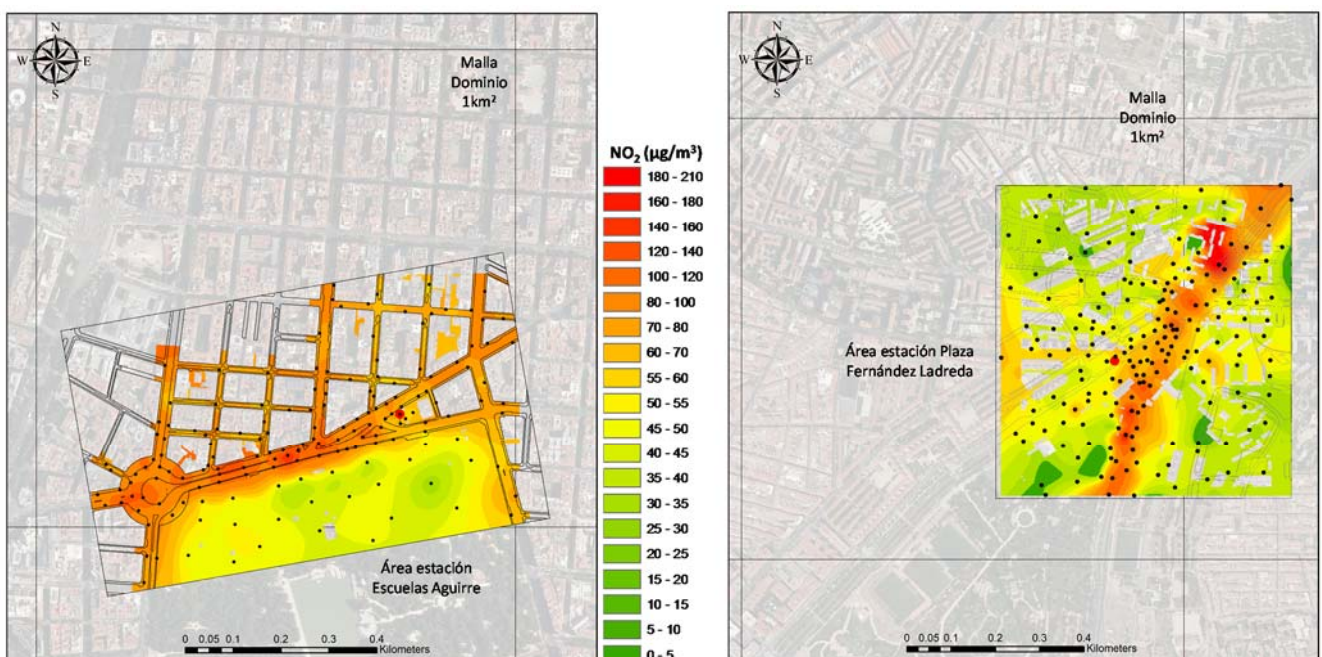
De forma análoga a lo apuntado para el  $PM_{10}$ , los valores de concentración medios de partículas finas podrían verse ligeramente incrementados en la zona sudeste del municipio debido a un incremento de la valoración de residuos urbanos previsto en el Plan A.

Pese a que estas reducciones sean discretas en términos absolutos, son considerables en términos relativos, especialmente en el centro de la ciudad donde la densidad de población es máxima y por tanto, donde más beneficiosas resultan las mejoras en los niveles de exposición de cara a la salud de los ciudadanos. Aunque este documento de síntesis se centra en los aspectos relativos a la calidad del aire, cabe destacar que según la simulación realizada, aproximadamente una tercera parte de la masa total de  $PM_{2.5}$  reducida (aproximadamente 78 toneladas/año) se corresponde con el aerosol primario de carbono elemental o *black carbon*. Además de ser una fracción muy perjudicial para la salud, estas partículas son especialmente nocivas para el calentamiento global. En contra de lo que sucede con el resto del aerosol atmosférico, el *black carbon* ejerce un potente efecto neto de calentamiento. Pese a que su tiempo de vida media en la atmósfera es mucho menor que el de los principales gases de efecto invernadero, distintos autores han estimado su potencial de calentamiento entre 330 y 2240 veces superior al del  $CO_2$ . Considerando estas referencias puede establecerse que la reducción de concentración de  $PM_{2.5}$  mostrada puede además contribuir considerablemente a los objetivos sobre cambio climático del Plan A (mismo orden de magnitud que la mejora lograda gracias a la reducción de GEI).

## **5. Variación de concentración en las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire y reflexiones sobre el cumplimiento futuro de los valores límite**

Según se ha comentado con anterioridad, el sistema de simulación utilizado permite dar una visión general consistente de la evolución de la calidad del aire en Madrid debido a la aplicación del Plan A. No obstante, sus características y resolución espacial impiden hacer evaluaciones fiables sobre el cumplimiento de los valores límite en la ciudad. Pese a esta limitación se ha considerado interesante hacer una sucinta reflexión de las variaciones obtenidas para la media anual de los principales contaminantes en los puntos en los que se localizan las estaciones y ponerlo en el contexto de los errores observados para el año base.

En la **Tabla 2** se resume la variación de concentración media anual promedio según el tipo de estación de acuerdo a las predicciones del modelo. En el caso del  $\text{NO}_2$ , las variaciones en todas las ubicaciones están alrededor del 25%, ligeramente superior a la media municipal. El valor individual más alto predicho en 2020 corresponde con la ubicación de Escuelas Aguirre ( $27,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), con lo que cabría pensar que es posible cumplir el valor objetivo de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No obstante, según se ha discutido anteriormente, el modelo utilizado es incapaz de considerar los gradientes de concentración tan acusados que existen en la ciudad, especialmente en ubicaciones de tráfico. Además de las simplificaciones del propio modelo y los errores introducidos por la representación de las emisiones y la meteorología, la propia escala de aplicación implica una serie de limitaciones. En la **Figura 12** se muestran, a modo de ejemplo, dos mapas de concentración media de  $\text{NO}_2$  elaborados a partir de campañas de medición experimentales recientes en un proyecto de investigación.



**Figura 12.** Ilustración de los gradientes espaciales de concentración de  $\text{NO}_2$  en zonas de tráfico en comparación con la resolución horizontal del modelo de mesoescala

Puede comprobarse que tanto en la zona de la estación de Escuelas Aguirre como en la de Fernández Ladreda, existen una gran variación de niveles incluso en una zona muy inferior a la cubierta por una celda del modelo euleriano. Se puede entender que los valores predichos por el modelo no son más que una variación razonable en un área de  $1 \text{ km}^2$ , lo que impide anticipar con precisión qué





valor se obtendrá en la ubicación exacta de la estación de vigilancia y, por tanto, el cumplimiento de los valores límite legales gracias a la aplicación del Plan A.

Según las observaciones correspondientes al año base que se utiliza como referencia, como media, el modelo infraestima la media anual de NO<sub>2</sub> en un 38%; aproximadamente 15 µg/m<sup>3</sup>. Asumiendo que dicha desviación se mantiene para el escenario futuro en cada una de las estaciones, se concluiría que la gran mayoría de estaciones podrían cumplir con los valores legales preceptivos para el 2020, excepto para la estación de Fernández Ladreda. En esta estación el error del modelo llega a un -54%, lo que se explica por la variación de concentración tan acusada observable en la **Figura 12**.

**Tabla 2.** Medias y variación de las concentraciones anuales medias de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> antes y después de la aplicación del Plan A por tipo de ubicación

Tipo de estación	Compuesto	Concentración media predicha		
		Base (µg/m <sup>3</sup> )	2020 (µg/m <sup>3</sup> )	Variación (%)
Tráfico	NO <sub>2</sub>	28,7	21,4	-25,3
	PM <sub>10</sub>	11,0	9,4	-14,1
	PM <sub>2.5</sub>	9,7	8,2	-15,9
Urbana de fondo	NO <sub>2</sub>	21,9	16,4	-24,9
	PM <sub>10</sub>	8,3	7,5	-9,7
	PM <sub>2.5</sub>	7,6	6,6	-12,6
Suburbana	NO <sub>2</sub>	15,0	11,1	-25,8
	PM <sub>10</sub>	7,8	7,1	-9,5
	PM <sub>2.5</sub>	6,8	6,1	-10,5

En lo que respecta al material particulado, los descensos previsibles son menores en términos relativos, especialmente para la fracción más gruesa (afectada en mayor medida por la resuspensión de partículas y otros procesos de difícil control). En cualquier caso, y como es lógico, dado el tipo de medidas del plan, se espera que la mejora sea máxima en estaciones de tráfico, con descensos



aproximados del 14% y 16% respectivamente para el  $PM_{10}$  y el  $PM_{2,5}$ . Aunque los errores del modelo son muy distintos en este caso (infraestimación respectiva del 57% y 25%), se puede aplicar el mismo razonamiento que para el  $NO_2$ . Asumiendo esta premisa se puede asegurar el cumplimiento de los valores exigibles legalmente. No obstante, la reducción podría resultar insuficiente para llegar a los valores propuestos por la OMS aunque la diferencia no sería muy elevada, especialmente en el caso del  $PM_{2,5}$ , que es la fracción más peligrosa para la salud humana con carácter general.

## 6. Resumen y conclusiones

En el presente estudio se sintetizan los resultados relativos al efecto que tendría la aplicación de las medidas definidas en el Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la ciudad de Madrid (Plan A) sobre la calidad del aire, en base a una reducción de las emisiones previstas en los sectores a los que afecta dichas medidas.

En la **Tabla 3** se resume la reducción de la concentración de los distintos valores límite de  $NO_2$ ,  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$  en tres áreas geográficas: conjunto del Municipio de Madrid, Interior de la Calle-30 y el Área central de cero emisiones. Para el promedio anual de concentración de  $NO_2$ , las reducciones en el interior del municipio son de entorno al 23%, lo que significa que se alcanzarían reducciones del orden de  $4 \mu g/m^3$ . En el interior de la Calle-30, estas reducciones son aún mayores, ligeramente por encima de  $7 \mu g/m^3$ . En el área denominada como “Área central de cero emisiones” estas reducciones podrían llegar a los  $10 \mu g/m^3$ , lo que supone una reducción muy considerable dados los esfuerzos recientes y los niveles actuales.

En general, los resultados indican que la reducción de emisiones a través de medidas de carácter estructural es capaz de reducir la concentración media anual de todos los principales contaminantes, pero también tendría un efecto muy considerable en la moderación de los picos de concentración, lo que contribuirá, sin duda, a la reducción de los episodios de alta concentración y limitará los efectos en salud de tipo agudo.



**Tabla 3.** Resumen de la reducción de la concentración en los valores límite de NO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub> en tres áreas geográfica:, Municipio Madrid en su conjunto, interior de la Calle-30 y el Área central de cero emisiones definido en el Plan A.

Contaminantes y periodos de promedios		Reducción (%) / (µg/m <sup>3</sup> )		
		En el Municipio	Interior Calle-30	Área central de cero emisiones
NO <sub>2</sub>	Media anual	23% / 4,0	26% / 7,3	30% / 9,6
	Percentil 99,8	20% / 1,8	18% / 24,7	20% / 27,9
PM <sub>10</sub>	Media anual	8% / 0,7	14% / 1,5	24% / 2,5
	Percentil 90,4	9% / 1,7	15% / 3,6	24% / 5,7
PM <sub>2,5</sub>	Media anual	9% / 0,6	16% / 1,4	24% / 2,2

En definitiva, la implementación del Plan A supondrá un avance significativo en la reducción de los efectos negativos de la contaminación atmosférica y acercará a Madrid a los objetivos planteados. No obstante, los métodos empleados en la evaluación, si bien son los más adecuados para este ejercicio, no permiten dirimir este extremo con precisión. Pese a que se presume un descenso del orden del 25% en las concentraciones de NO<sub>2</sub> observadas en las estaciones de la red de vigilancia, no es posible garantizar que el Plan A sea suficiente para dar cumplimiento al valor límite anual en todas las ubicaciones, especialmente aquellas de tráfico, lo que abre la posibilidad al estudio, diseño e implementación de medidas complementarias de carácter local, al menos en los *hotspots* conocidos. Los resultados apuntan a que Madrid no tendrá ninguna dificultad en cumplir con los valores legales preceptivos para el material particulado si se implementan las actuaciones previstas en el Plan, pero éstas podrían resultar insuficientes para llegar a los niveles propuestos por la Organización Mundial de la Salud. No obstante, supondría una mejora significativa, especialmente para el caso del PM<sub>2,5</sub>, que es la fracción más peligrosa para la salud humana con carácter general. De forma adicional, se estima que la reducción de *black carbon* asociado a este compuesto podría tener además un efecto complementario muy beneficioso en la lucha contra el cambio climático y la mitigación de sus efectos negativos localmente.