



CONVENIO DE INVESTIGACIÓN

"MODELIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE DE LA COMUNIDAD DE MADRID"

ENTRE LA COMUNIDAD DE MADRID Y LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID (UPM)

ANÁLISIS DE CONTRIBUCIÓN DE FUENTES

Resumen ejecutivo

Enero 2022

Laboratorio de Modelización Ambiental

ETSI Industriales. Universidad Politécnica de Madrid

Objetivo

El presente documento resume los resultados y la metodología del estudio de contribución de fuentes realizado en el marco de la primera anualidad del convenio de investigación "Modelización de la Calidad del aire en la Comunidad de Madrid" (Convenio) firmado entre la Comunidad de Madrid (Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio y Sostenibilidad) y la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). El objetivo de este estudio es atribuir a los diferentes sectores (industria, transporte, residencial, etc.) su contribución a las concentraciones en el aire de los principales contaminantes en la Comunidad de Madrid. Esta información es esencial para entender la importancia relativa de cada uno de los sectores emisores y orientar consecuentemente las medidas de reducción de emisiones. En concreto, estos resultados pretenden ser de utilidad para la definición de la Estrategia de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Calidad del Aire 2021 –2030 de la Comunidad de Madrid. Los contaminantes estudiados son el óxido de nitrógeno (NO₂), las partículas (PM₁₀ y PM_{2,5}) y el ozono (O₃), que son los compuestos más relevantes de cara al cumplimiento de la legislación vigente según el RD 102/2011 y debido a sus impactos negativos en la salud y los ecosistemas. El periodo de referencia es el año 2018, que corresponde con el año base de las simulaciones realizadas en el marco del Convenio.

Introducción

El Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, y el Real Decreto 39/2017, de 27 de enero, que lo modifica, relativo a la mejora de la calidad del aire, traspone al ordenamiento jurídico nacional la Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y sirve de marco regulador para la gestión de la calidad del aire. Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha revisado en septiembre de 2021 sus valores guía (WHO, 2021), que señalan las concentraciones máximas deseables para minimizar los efectos negativos de la contaminación atmosférica a nivel internacional (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de los valores límite fijados por el Real Decreto 102/2011 para la protección de la salud humana y los valores guía definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Además de los valores guía actuales, propuestos en 2021, se indican entre paréntesis los valores propuestos por la OMS en 2005

Parámetro	NO ₂ (µg/m ³)		PM ₁₀ (µg/m ³)		PM _{2,5} (µg/m ³)		O ₃ (µg/m ³)	
	RD 102/2011	OMS	RD 102/2011	OMS	RD 102/2011	OMS	RD 102/2011	OMS
Media anual	40	10 (40)	40	15 (20)	20	5 (10)	-	-
Media 24 horas	-	25 (-) (II)*	50 (III)*	45 (50) (II)*	-	15 (25) (II)*	-	-
Media horaria	200 (I)*	-(200)	-	-	-	-	-	-
Media máxima 8 horas	-	-	-	-	-	-	120 (IV)*	100 (100) (IV)*

* (I) No se puede superar más de 18 veces al año (percentil 99,8)

* (II) No se puede superar más de 3-4 veces al año (percentil 99).

* (III) No puede superarse más de 35 veces al año (percentil.90,4)

* (IV) Media de las 8 horas diarias con la concentración máxima de O₃ en los 6 meses consecutivos con las concentraciones más elevadas de O₃.

La Comunidad de Madrid cuenta actualmente con 24 estaciones de medición de la calidad del aire (desde la instalación de la estación de Cotos en 2020) para verificar el cumplimiento de estos niveles de concentración en el aire ambiente. Estas estaciones están situadas en localizaciones de características específicas para dar información relativa a la contaminación en todo el territorio. Las estaciones se clasifican

en los siguientes grupos y sus localizaciones se pueden observar en la Figura 1. Esta red se complementa con la del Ayuntamiento de Madrid que cuenta con otros 24 puntos de medida dentro de dicho municipio.

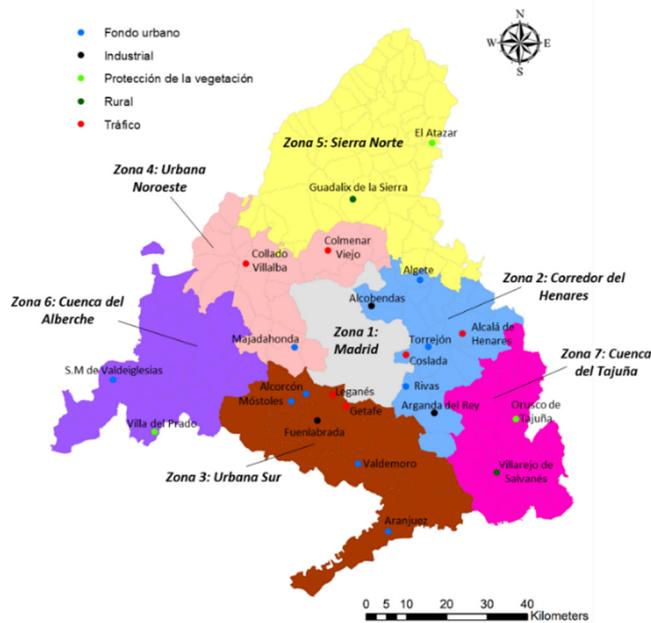


Figura 1. Zonificación y estaciones de la red de vigilancia gestionada por la Comunidad de Madrid

- **Estaciones rurales / para la protección de la vegetación:** Orusco de Tajuña, Villa de Prado, El Atazar, Guadalix de la Sierra y San Martín de Valdeiglesias
- **Estaciones de fondo:** Torrejón de Ardoz, Móstoles, Alcorcón, Majadahonda, Aranjuez, Rivas-Vaciamadrid, Algete, Valdemoro
- **Estaciones industriales:** Fuenlabrada y Arganda del Rey
- **Estaciones de tráfico:** Villarejo de Salvanes, Alcobendas, Leganés, Alcalá de Henares, Getafe, Coslada, Colmenar Viejo y Collado Villalba

Gracias a esta infraestructura se puede hacer un seguimiento de la calidad del aire en la región. Tomando como referencia el año 2018 y centrandolo en los contaminantes más relevantes desde el punto de vista de sus efectos en la salud NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ y O_3 se puede concluir que los incumplimientos de la legislación son muy limitados, pero son muy superiores a los propuestos por la OMS con carácter general.

Los valores más elevados de dióxido de nitrógeno (NO_2) se relacionan con estaciones de tráfico. En concreto, la estación de Coslada, con $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, supone la única excedencia del valor límite anual para la protección de la salud humana legalmente establecido para este contaminante ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). No obstante, el valor recomendado por la OMS (media anual de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sólo se alcanza en tres de tipo "rural". Con respecto al valor límite horario para la protección de la salud humana marcado por el RD 102/2011 ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$), durante el año 2018 no se superó en ninguna estación. Con carácter general cabe apuntar que los valores más elevados se registraron en los meses de invierno.

En el caso de las partículas de $10 \mu\text{m}$ o menores (PM_{10}), ninguna de las estaciones de la red superó el valor límite anual para la protección de la salud humana marcado por el RD 102/2011 ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Sin embargo, sólo 5 estaciones registraron medias anuales compatibles con las recomendaciones más recientes de la OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Mientras que los niveles anuales más altos corresponden a estaciones de tráfico (Torrejón de Ardoz y Coslada; ambas con $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$), el número de días con valores por encima de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (valor límite diario) se observó en Villa del Prado (de tipo rural), con 13 superaciones. En lo que respecta a las partículas más finas ($\text{PM}_{2,5}$), todas las estaciones presentaron valores por debajo del valor límite anual del RD102/2011 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y por encima del valor guía de la OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Los valores más elevados se registraron en las estaciones de Torrejón de Ardoz, Algete y Villa del prado, con 12, 12 y $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

En el caso del ozono troposférico (O_3) se han dado superaciones del límite marcado para la protección de la salud humana por el RD 102/2011 (que establece que la media móvil octohoraria máxima por encima de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que no pueden superarse en más de 25 ocasiones en un año) en 16 de 22 estaciones, con los

niveles más elevados registrados en El Atazar, Guadalix de la Sierra y Alcobendas. Este contaminante presenta sus valores máximos típicamente en verano y medias elevadas en ubicaciones rurales de fondo.

Metodología

El análisis de contribución de fuentes se basa en la aplicación de un sistema de modelización de última generación que consta de tres componentes. El primero es el modelo meteorológico WRF (*Weather Research and Forecasting*) que genera datos meteorológicos tridimensionales continuos durante todo el año 2018. Esta información es muy importante ya que el viento y otras variables meteorológicas influyen enormemente los niveles de contaminación. A continuación, el modelo SMOKE (*Sparse Matrix Operator Kernel Emissions*) permite repartir las emisiones en el tiempo y el espacio a través de perfiles específicos para cada una de las fuentes presentes en el inventario de emisiones para simular con la mayor precisión posible los patrones reales de emisión. Por último, se ha utilizado el modelo de transporte-química CMAQ, (*Community Multiscale Air Quality Modelling System*) que con la información aportada por WRF y SMOKE calcula la concentración de los contaminantes que se quieren estudiar en todas las zonas del dominio durante todo el año estudiado. Además, en este estudio se ha utilizado CMAQ-ISAM, una adición que permite trazar los contaminantes desde su lugar de emisión para explicar los niveles de concentración en el aire ambiente de forma consistente para todas las fuentes y sustancias, incluyendo contaminantes secundarios que no son emitidos directamente, sino que se forman a posteriori en la atmósfera por diversos procesos físico-químicos. Se trata de una metodología novedosa que permite solventar algunas de las limitaciones de otros métodos de atribución de fuentes y dar una imagen más completa y realista del origen de todos los contaminantes. Este análisis se llama "contribución de fuentes", ya que especifica la contribución de cada fuente emisora a los niveles de calidad del aire de un contaminante específico. La contribución de fuentes en este estudio se ha realizado a nivel de sector (industria, tráfico rodado, agricultura, etc) de acuerdo a la nomenclatura SNAP (*Selected Nomenclature for Air Pollution*). Adicionalmente, esta metodología permite discriminar el origen geográfico de las emisiones, en este caso, identificando las contribuciones del municipio de Madrid, resto de la Comunidad de Madrid, zona aledaña a la misma y contaminación externa (nacional e internacional).

Principales resultados

Con respecto al NO₂, como se puede observar en la Figura 2 (izquierda), los niveles más elevados de este contaminante se registran en la zona central y sur del municipio de Madrid y en la Zona 3 (Urbana sur). Esto se debe a los elevados niveles de tráfico rodado en estas zonas, hecho que se corrobora en la Figura 2 (derecha), donde se observa que el SNAP 7 (Tráfico rodado) es responsable, como media, del 39% de los niveles de concentración (media anual) de NO₂ en la Comunidad de Madrid. No obstante, esta contribución llega a superar el 80% en el centro de Madrid. En el caso de la estación de Coslada, que registra los niveles más altos de NO₂ dentro de la Comunidad de Madrid (excluyendo las estaciones del Ayuntamiento de Madrid), se observa que el SNAP 7 contribuye con 18 µg/m³ a la media anual (de un total de 41 µg/m³). En este caso concreto, las emisiones del municipio de Madrid y del resto de la Comunidad tienen una influencia similar. Por otro lado, en la Figura 3 se representa el percentil 99,8 de los valores horarios de NO₂ que presenta unos gradientes espaciales similares. También se puede observar que el tráfico es la fuente más importante para explicar los picos de concentración de este contaminante, con una contribución también cercana al 40% como promedio para el conjunto de la región. La diferencia más notable es el origen de las emisiones del tráfico rodado. Mientras que para la media anual el 74% de la contribución sectorial procede de la propia Comunidad y un 19% del municipio de Madrid, en cambio en el caso de los valores horarios la contribución del municipio de Madrid crece hasta el 36% de las fuentes locales. De forma consistente con los resultados de estudios previos, se observa que la contribución de fuentes de zonas adyacentes a la Comunidad de Madrid es menor, del orden del 7% del total de las fuentes incluidas en el dominio de simulación. Esto indica que el tráfico de la Comunidad de Madrid (excluyendo Madrid) tiene más influencia en los niveles medios de concentración, mientras que éste municipio tiene más

influencia en los picos de concentración. La contribución de fuentes más lejanas (resto de España e y otros países; expresada como "BCON" en los gráficos), sobre las que en principio no se tiene ningún control, explica un 30% y 16% de los niveles medios y máximos de NO₂, respectivamente.

Las simulaciones indican que en los valores horarios gana influencia la SNAP 2 (sector residencial, comercial e institucional), segundo sector emisor en importancia relativa, que pasa de un 8% a un 13%. Este comportamiento es esperable considerando que la mayor parte de las emisiones de este sector se producen en invierno, por lo que su importancia decrece cuando el análisis se extiende al conjunto del año. En cambio, el sector residencial tiene mayor importancia en los picos de concentración, que suelen producirse en invierno, cuando se suman las emisiones del tráfico a las del sector residencial y suele haber condiciones meteorológicas favorables para episodios de alta contaminación.

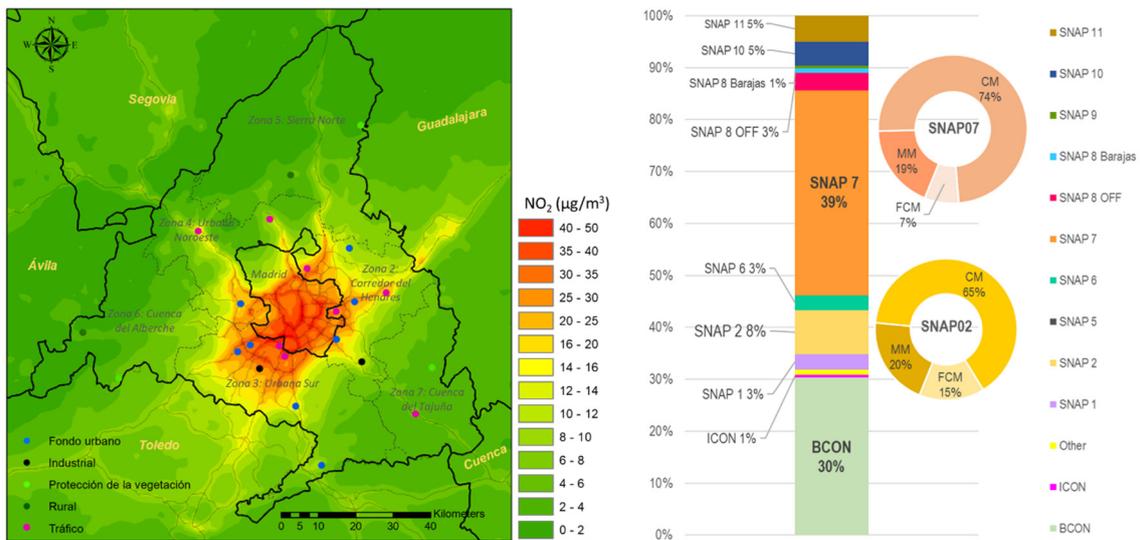


Figura 2. Concentración media anual de NO₂. Distribución geográfica (izquierda) y contribución de fuentes media para el conjunto de la región, incluyendo el municipio de Madrid (derecha)

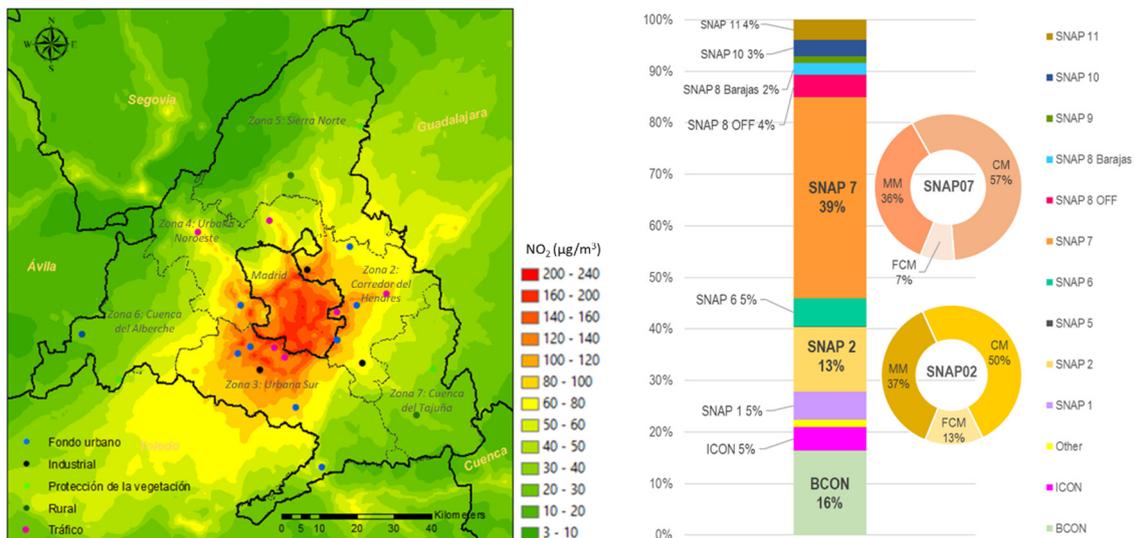


Figura 3. Percentil horario 99,8 de NO₂. Distribución geográfica (izquierda) y contribución de fuentes media para el conjunto de la región, incluyendo el municipio de Madrid (derecha)

En el caso de las PM₁₀, como se puede observar en la Figura 4, igual que en el caso del NO₂, las zonas con los niveles más elevados de PM₁₀ son el municipio de Madrid y la Urbana Sur (zonas 1 y 3 respectivamente). En este caso, la gran diferencia consiste en que los mayores contribuyentes a los niveles de concentración en el aire ambiente de PM₁₀ son fuentes no antropogénicas. Puede notarse que, como media en la región, la suma del polvo mineral y el aerosol marino supera el 40%, lo que sumado a un 14% de contribución de fuentes externas al dominio de simulación, reduce considerablemente el margen de actuación (esto es más acusado en relación a los máximos diarios). En lo que respecta a las emisiones antropogénicas, de nuevo los grupos SNAP 2 y SNAP 7 son los más influyentes, con una contribución conjunta del 17%.

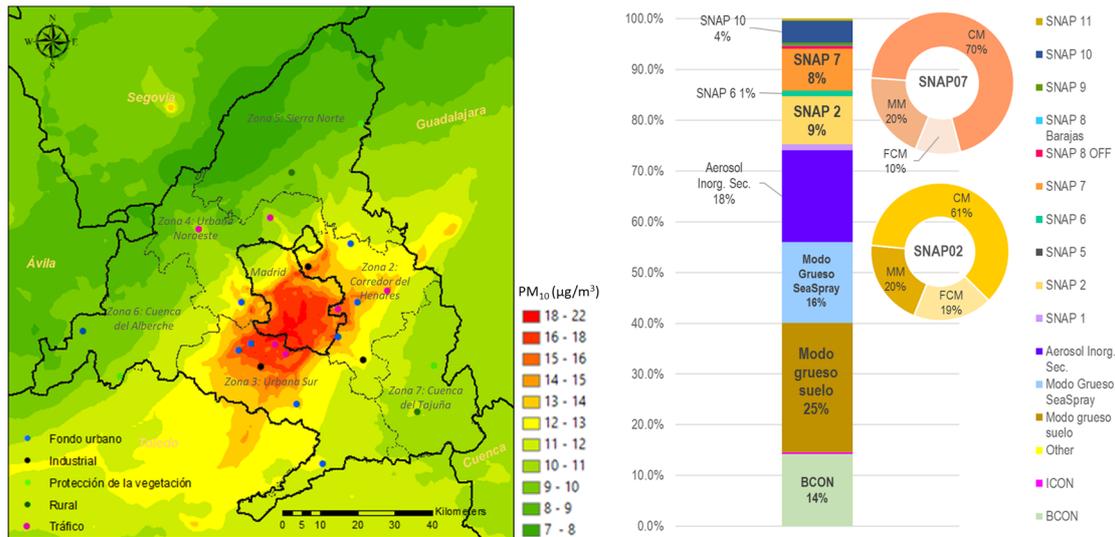


Figura 4. Concentración media anual de PM₁₀. Distribución geográfica (izquierda) y contribución de fuentes media para el conjunto de la región, incluyendo el municipio de Madrid (derecha)

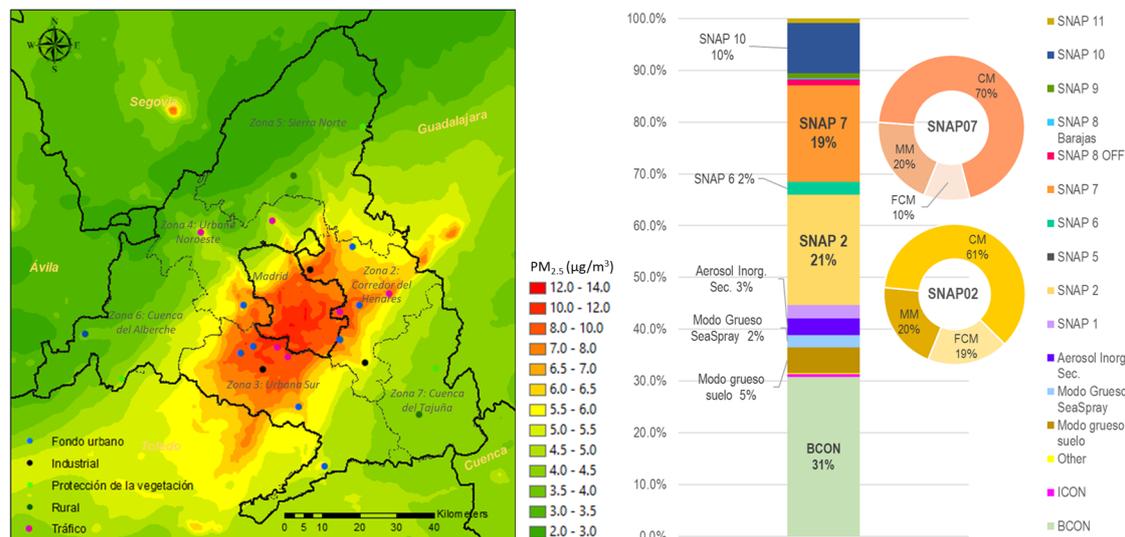


Figura 5. Concentración media anual de PM_{2.5}. Distribución geográfica (izquierda) y contribución de fuentes media para el conjunto de la región, incluyendo el municipio de Madrid (derecha)

La distribución geográfica de los niveles de concentración de PM_{2.5} (Figura 5) es muy parecida a la del PM₁₀, pero la contribución de fuentes es muy diferente, ya que las fuentes naturales suman solo un 10%. Esto se debe a que la importancia relativa de las fuentes no antropogénicas para las partículas más finas, más asociadas a procesos de combustión, es menor. En este caso, la contribución a la media anual de los grupos SNAP 2 y SNAP 7 se eleva hasta 40%. No obstante, dada la mayor vida media de estas partículas

en la atmósfera, la contribución de fuentes de larga distancia es mayor, alcanzando un 31% del total. La particularidad de este contaminante es la mayor contribución relativa del grupo SNAP 10 (agricultura), responsable del 10%, de la concentración de PM_{2,5} como media en la región. Tanto para PM₁₀ como para PM_{2,5} la influencia de las fuentes ubicadas fuera del municipio de Madrid es mayor que las de las fuentes de dicho municipio. Cabe destacar que en las estaciones con niveles más elevados de PM_{2,5} (Torrejón de Ardoz y Algete) la contribución de las emisiones del sector RCI (SNAP 2) y tráfico (SNAP 7) asciende a 7 µg/m³, lo que supone un 58% del total, indicando que existe un amplio margen de mejora aplicando medidas sobre estos dos sectores dentro de la Comunidad de Madrid.

El ozono, según se ilustra en la Figura 6 (izquierda), presenta patrones de contaminación muy distintos al del resto de contaminantes. En el caso de las máximas octohorarias, parámetro relevante para la salud humana, las concentraciones máximas no se dan en el sur del municipio, sino en el norte de este y en las zonas del Corredor del Henares (Zona 2) y el sur de la Sierra Norte (Zona 5). Esta distribución se justifica con que el ozono es un contaminante secundario que se genera en la atmósfera por reacción de los óxidos de nitrógeno (NO_x) con compuestos orgánicos volátiles (COVS). Cabe destacar que en escalas espacio-temporales reducidas, el O₃ es consumido para oxidar el NO lo que hace que los niveles de este compuesto secundario sean mínimos en las zonas de máxima emisión de NO_x, por ejemplo, zonas de gran intensidad de tráfico rodado. Por otro lado, los resultados de este trabajo vienen a confirmar los resultados de estudios previos que indican que los niveles medios de ozono están enormemente condicionados por los niveles de fondo. Aunque esto es particularmente importante para los niveles medios, también tiene una gran influencia en los niveles máximos octohorarios. Como se puede observar en la Figura 6 (derecha), el mayor contribuyente son las condiciones de contorno (BCON) con un 59%, lo que quiere decir que se debe al transporte de este contaminante desde áreas fuera del dominio de simulación (Figura 6 izquierda). Esto supone una limitación importante para el planteamiento de medidas locales eficaces para reducir los niveles de este compuesto. Cabe destacar que además el ozono juega un papel importante en la producción de NO₂ y PM_{2,5} secundarios.

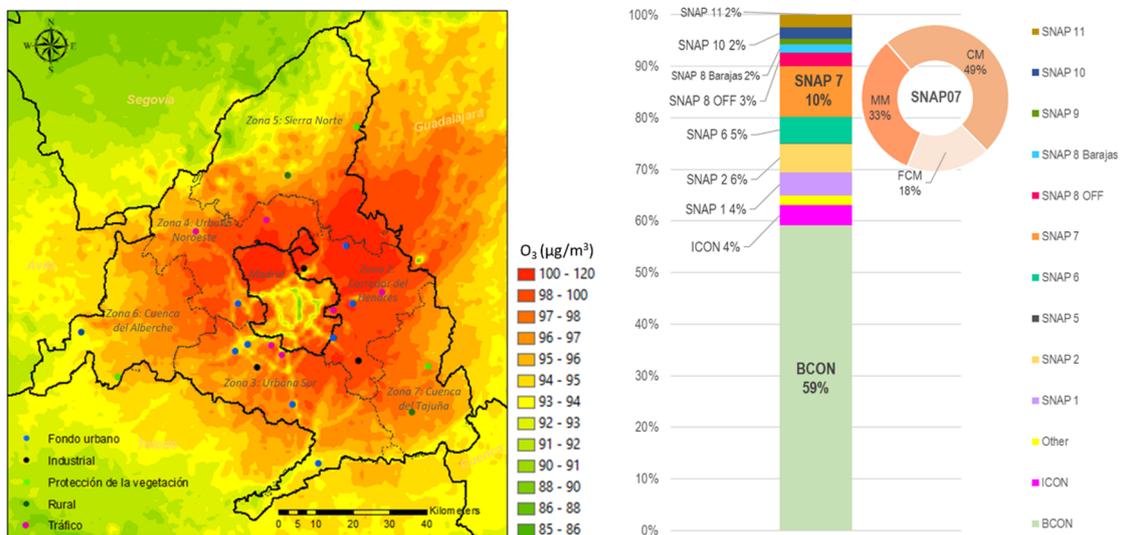


Figura 6. Percentil 93,2 del Ozono en la Comunidad de Madrid. Distribución geográfica (izquierda) y contribución de fuentes media para el conjunto de la región, incluyendo el municipio de Madrid (derecha)

Dentro de las fuentes locales, la que tienen una mayor influencia es la del tráfico rodado (SNAP 7), con una contribución media en la región del 10%, porcentaje que se eleva hasta el 16% en zonas periurbanas como la estación de Alcobendas. Estos resultados apoyan que existe mayor margen de control para regular los picos de ozono que los valores medios. Sin embargo, el análisis de posibles medidas debe basarse en estudios específicos del efecto de reducciones de emisiones concretas bajo las condiciones meteorológicas que típicamente se asocian a los picos de concentración de este compuesto.

Conclusiones

Los resultados preliminares indican que existe un amplio margen de mejora a través de la actuación sobre las fuentes locales para reducir los niveles de NO_2 y $\text{PM}_{2,5}$, en contra de lo que sucede con el O_3 , que mayoritariamente procede de fuera de la región. Según se analiza en el documento, las medidas locales podrían ser particularmente eficaces para reducir los niveles más altos, incluyendo los picos de O_3 , ya que la contribución de fuentes apunta a una menor influencia de las fuentes externas a la región en comparación con la que existe en relación a los valores medios. En el caso de las partículas más gruesas (PM_{10}), la contribución de fuentes controlables es también menor debido a que las aportaciones naturales (como el polvo mineral) tienen una contribución muy significativa.

Dentro de las fuentes locales, los resultados en este documento son consistentes con las conclusiones generales de estudios previos, que apuntan al tráfico rodado como fuente más relevante y, por tanto, sector prioritario de las medidas de la futura Estrategia de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y Calidad del Aire 2021 –2030 de la Comunidad de Madrid. En segundo lugar de importancia se situaría el sector residencial, comercial e institucional (RCI), que también tiene un papel fundamental en los niveles de concentración de NO_2 y $\text{PM}_{2,5}$, sobre todo en invierno. Finalmente, se puede mencionar la contribución de la agricultura como tercer sector relevante en relación a la contaminación por material particulado.

Independientemente de esta conclusión general, los resultados en el informe indican que la contribución es variable geográficamente, lo que aporta información adicional para facilitar el cumplimiento de la legislación vigente en todas las zonas de la región. De los resultados se puede deducir la importancia de coordinar las políticas entre diversas administraciones, fundamentalmente el Ayuntamiento de Madrid, ya que las emisiones producidas en este municipio tienen un efecto notable en toda la región. En un contexto más amplio, se precisa además la colaboración a nivel nacional e internacional para poder alcanzar los valores guía propuestos por la OMS, ya que, en algunos casos, sería inviable a través de actuaciones a nivel regional exclusivamente.