



ESTUDIO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE LA CONTRIBUCIÓN DE FUENTES A LOS NIVELES DE CALIDAD DEL AIRE EN EL MUNICIPIO DE MADRID

Septiembre 2017

ÍNDICE

1. Objetivo	4
2. Introducción	4
3. Metodología	5
4. Resultados del análisis de contribución de fuentes	8
4.1. Análisis de contribución de fuentes en el Municipio de Madrid.....	8
4.1.1. Dióxido de nitrógeno (NO₂).....	8
4.1.2. Material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5})	13
4.2. Análisis de contribución de fuentes en las estaciones.....	18
4.2.1. Dióxido de nitrógeno (NO₂).....	18
4.2.2. Material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5})	20
5. Resumen y conclusiones.....	23

Índice de tablas

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 límite definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).....	4
Tabla 2. Emisiones de PM _{2,5} y NO _x en el municipio de Madrid según grupos de actividad SNAP. En negrita los sectores utilizados en el análisis de contribución de fuentes y su contribución en % en termino de emisiones para el año base	6
Tabla 3. Resumen del análisis de contribución de fuentes para la concentración media anual de NO ₂ , y PM _{2,5} como media en el total del Municipio de Madrid	23

Índice de figuras

Figura 1. Dominios empleados en la simulación. (a) Dominio D1 (Europa, resolución 48x48 km), D2 (España, 16x16 km) y D3 (Comunidad de Madrid, 4x4 km). (b) Dominio D4, (Ayuntamiento de Madrid 1x1 km) con indicación de la posición de las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid.	5
Figura 2. Concentración media anual de NO ₂ predicha para el año 2012	9
Figura 3. Resumen de resultados del análisis de contribución de fuentes (concentración media anual de NO ₂ para el conjunto del Municipio de Madrid).....	10
Figura 4. Contribución a la media anual de NO ₂ para el año 2012 en el municipio de Madrid, (a) local, (b) regional, (c) SNAP 02, (d) SNAP 03-04, (e) SNAP 07, (f) SNAP 08 (tráfico aéreo).....	11
Figura 5. Concentración media anual predicha de PM ₁₀ (a) y de PM _{2.5} (b) para el año 2012	13
Figura 6. Resumen de resultados del análisis de contribución de fuentes (concentración media anual de PM ₁₀ para el conjunto del Municipio de Madrid).....	14
Figura 7. Resumen de resultados del análisis de contribución de fuentes (concentración media anual de PM _{2,5} para el conjunto del Municipio de Madrid).....	15
Figura 8. Contribución a la media anual de PM _{2,5} para el año 2012 en el municipio de Madrid, (a) local, (b) regional, (c) nacional, (d) internacional, (e) SNAP 02, (f) SNAP 07.....	17
Figura 9. Contribución a la media anual de NO ₂ para las estaciones de fondo (año 2012).....	18
Figura 10. Contribución a la media anual de NO ₂ para las estaciones de tráfico y estaciones suburbanas (año 2012).....	19
Figura 11. Estudio de contribución de fuentes (PM ₁₀) para las estaciones suburbanas, estaciones de tráfico y estaciones de fondo (año 2012).....	21
Figura 12. Estudio de contribución de fuentes (PM _{2.5}) para las estaciones suburbanas, estaciones de tráfico y estaciones de fondo (año 2012).....	22

1. Objetivo

El objetivo del presente estudio es realizar un análisis de contribución de fuentes para determinar qué sectores y ámbitos geográficos son responsables de los niveles de concentración de los principales contaminantes en Madrid (NO₂, PM₁₀ y PM_{2,5}). Esta información es esencial para entender el margen de mejora asociado a cada uno de los sectores y orientar las medidas de reducción de emisiones de forma óptima. Concretamente este documento sintetiza la metodología y principales resultados del análisis de contribución de fuentes en términos de concentración en el aire ambiente para integrar en el punto 3.4. (Análisis de emisiones contaminantes y GEI. Fuentes) del Plan A (Plan de Calidad del Aire y Cambio Climático de la Ciudad de Madrid).

2. Introducción

Uno de los objetivos principales del Plan A es la reducción de las emisiones contaminantes a la atmósfera con el propósito de cumplir con los valores límite de concentración compatibles con los valores guía de concentración definidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) tanto para el dióxido de nitrógeno (NO₂) como para partículas (PM₁₀ y PM_{2,5}). Estos valores se muestran en la **Tabla 1** en comparación con los determinados por el real decreto 102/2011, de obligado cumplimiento en todas las ciudades de los estados miembros de la Unión Europea.

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 ₂ (µg/m ³)		PM ₁₀ (µg/m ³)		PM _{2,5} (µg/m ³)	
	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

El otro gran objetivo que persigue el Plan A es la reducción de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI, 2020-2030) en consonancia al Acuerdo de París celebrado en diciembre de 2015. Específicamente Madrid, como ciudad firmante del nuevo Pacto de Alcaldes para el Clima y la Energía, también tiene el compromiso de reducir en un 40% las emisiones de estos gases, así como el compromiso de reducir en una 50% las emisiones causadas por la movilidad urbana en 2030 con respecto a 2012.

3. Metodología

El estudio de contribución de fuentes a los niveles de concentración de NO₂ y PM se ha realizado mediante un sistema de modelización de la calidad del aire de alta resolución implementado por la Universidad Politécnica de Madrid para la zona de estudio; un área con unas dimensiones de 40 km (X) x 44 km (Y), que engloba el área metropolitana de Madrid (**Figura 1**; más detalles **ANEXO I**). Este sistema también se ha utilizado para estimar la de calidad del aire en la ciudad de Madrid en el año 2020, tras la implantación de las medidas recogidas en el Plan A.

La aproximación metodológica así como la selección de los sectores para dicho análisis se basa en un estudio previo que data de diciembre de 2016 llamado “Estudio para la cuantificación de la contribución de fuentes a los niveles de calidad del aire en el municipio de Madrid”, realizado por la Universidad Politécnica de Madrid para las emisiones del año 2007.

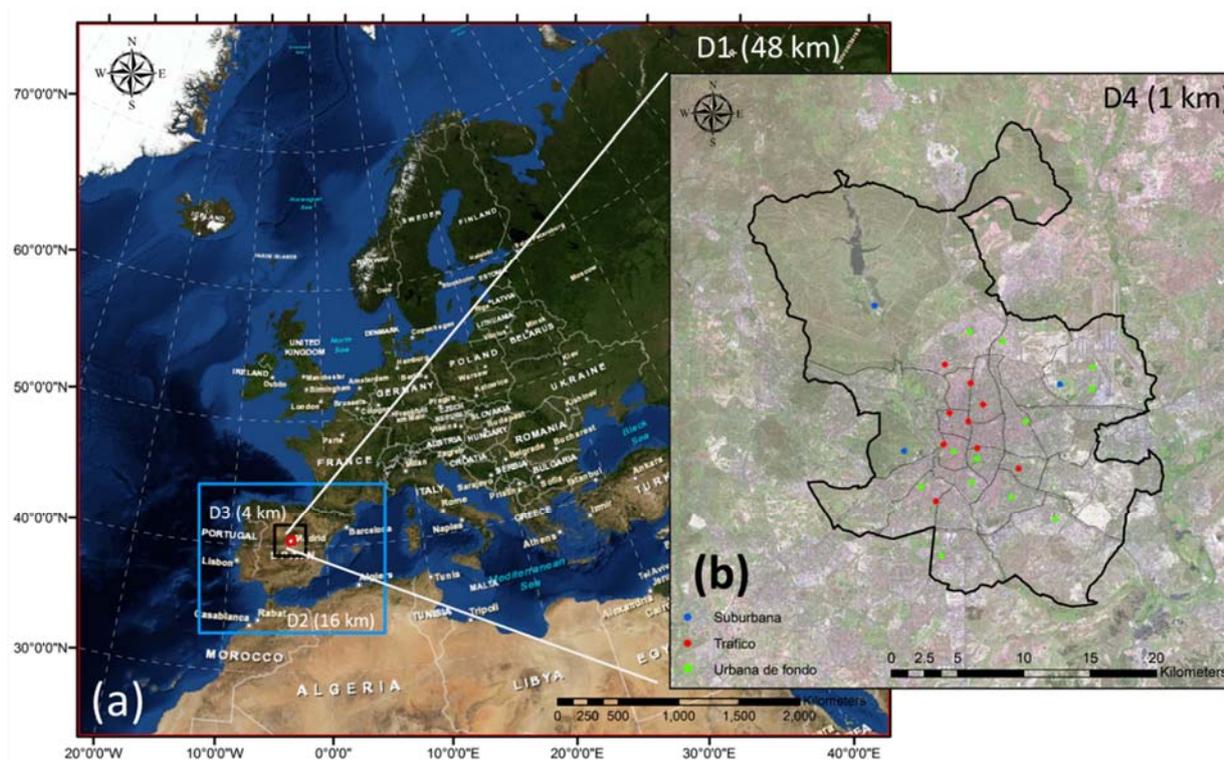


Figura 1. Dominios empleados en la simulación. (a) Dominio D1 (Europa, resolución 48x48 km²), D2 (España, 16x16 km²) y D3 (Comunidad de Madrid, 4x4 km²). (b) Dominio D4, (Ayuntamiento de

Madrid 1x1 km²) con indicación de la posición de las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid.

En este caso, los datos de entrada de emisiones para incorporar en este sistema, corresponden al año 2012, elegido como año de referencia por ser el último con datos disponibles en cuanto a inventarios oficiales de emisión común en todos los dominios en el momento de iniciar los trabajos (ver **ANEXO I**), es decir en el ámbito internacional, nacional, autonómico y local. Todas las emisiones son tratadas de forma consistente a través de las escalas y consideran métodos específicos de estimación y procesado para cada tipo de fuente. En la **Tabla 2** se resumen las emisiones correspondientes al Ayuntamiento de Madrid conforme al máximo nivel de agregación de la nomenclatura SNAP (*Selected Nomenclature for Air Pollution*), que considera tres niveles jerárquicos (grupo, subgrupo y actividad), según los datos del “Inventario de Emisiones de Contaminantes a la Atmósfera en el Municipio de Madrid 2014”.

Tabla 2. *Emisiones de PM_{2.5} y NO_x en el municipio de Madrid según grupos de actividad SNAP. En negrita los sectores utilizados en el análisis de contribución de fuentes y su contribución en % en termino de emisiones para el año base*

Grupo SNAP	Descripción	Contribución (%) de las emisiones de PM _{2.5} y NO _x
01	Combustión en la producción y transformación de energía	-
02	Plantas de combustión no industrial	35.9% (PM _{2.5}) y 17.5% (NO _x)
03	Plantas de combustión industrial	0.9% (PM _{2.5}) y 6.1% (NO _x)
04	Procesos industriales sin combustión	
05	Extracción y distribución de combustibles fósiles y energía geotérmica	-
06	Usos de disolventes y otros productos	-
07	Transporte por carretera	55% (PM _{2.5}) y 47.8% (NO _x)
08	Otros modos de transporte y maquinaria móvil (Aeropuerto de Barajas)	±5% (PM _{2.5}) y ±17% (NO _x)
09	Tratamiento y eliminación de residuos	-
10	Agricultura	-
11	Otras fuentes y sumideros (Naturaleza)	-

El procedimiento que se ha llevado a cabo para el análisis de contribución de fuentes ha seguido la metodología conocida como “zero-out”. Este método se basa en el análisis de la variación de concentración de la calidad del aire respecto al escenario base cuando se anulan las emisiones de un determinado sector emisor o región cuya contribución se pretende evaluar. Este tipo de estudios permiten acotar la posible mejora de la calidad del aire mediante la reducción de las emisiones en las actividades más relevantes.

Para ello, se han definido un total de ocho escenarios que han permitido determinar las contribuciones de los principales sectores (4 escenarios) y regiones geográficas (4 escenarios) además del escenario base, que es aquel que considera las emisiones de todas las fuentes en todos los ámbitos geográficos. Así pues, se han realizado simulaciones considerando una reducción del 100% de las emisiones del tráfico rodado (SNAP 07) que como se puede observar en la **Tabla 2** representa aproximadamente el 55% de las emisiones de $PM_{2.5}$ y el 47.8% de las emisiones de NO_x . El sector industrial viene representado por los grupos SNAP 03 y 04, y tiene una contribución mucho menor, ya que es responsable sólo del 0,9% de las emisiones de $PM_{2.5}$ y el 6,1% de NO_x . Una de las fuentes más importantes en el área de estudio es el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, que se inventaría dentro del grupo “otros modos de transporte y maquinaria móvil” (SNAP 08). El tráfico aéreo de dicho aeropuerto contribuye con un 3,8% y un 16,4% al total de las emisiones de $PM_{2.5}$ y NO_x de Madrid respectivamente. También se ha analizado la contribución de los sectores residencial, comercial e institucional (RCI) (SNAP 02), siendo su contribución a las emisiones de $PM_{2.5}$ de aproximadamente un 36,0% y de un 17,5% para las emisiones de NO_x . Estos cuatro sectores son los más relevantes para el estudio de su contribución a los niveles de inmisión, ya que en su conjunto son responsables del 97% y 89% de las emisiones totales de $PM_{2.5}$ y NO_x en Madrid.

Adicionalmente, se aplica una metodología similar, para determinar la contribución de las principales áreas geográficas, que permita estimar la contribución local (Municipio de Madrid), regional (Comunidad Autónoma de Madrid), nacional (España) e internacional (Europa). Esta aproximación es posible gracias a la simulación de mesoescala de 4 dominios anidados, donde se va simulando con mayor detalle la calidad del aire y se generan las condiciones de contorno necesarias para continuar con la modelización en los dominios interiores. La aplicación de máscaras geográficas para eliminar emisiones y el uso de condiciones de contorno alternativas permiten entender la contribución de las fuentes de los distintos ámbitos geográficos de interés.

4. Resultados del análisis de contribución de fuentes

Todos los resultados mostrados en este apartado se corresponden con las salidas del sistema de modelización para el dominio representado en la **Figura 1b** (con una resolución espacial de 1 km²). Este apartado se estructura en dos grandes bloques. Por un lado, se muestran los resultados de contribución de la cada uno de los sectores y áreas geográficas para el conjunto del término municipal de Madrid. Además de presentar una visión general de la estructura de contribución a los niveles medios anuales, es un análisis muy relevante ya que muestra con claridad la contribución de las fuentes locales, que son aquellas sobre las que el Ayuntamiento tiene capacidad de influir directamente y por tanto, las que deben centrar los esfuerzos de reducción en el Plan A. Posteriormente, se presenta un análisis complementario en el que se aborda la contribución por tipos de ubicación dentro de la ciudad, utilizando la localización de las estaciones de la red de vigilancia de la calidad del aire del Ayuntamiento como referencia. Esta información puede ser particularmente útil para entender el efecto que las medidas destinadas a reducir las emisiones de los principales sectores podría tener en los valores de concentración media observados para los contaminantes de interés (NO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}).

4.1. Análisis de contribución de fuentes en el Municipio de Madrid

4.1.1. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

Los resultados de la simulación para la concentración media anual de NO₂ para el año 2012 (“caso base”) para el dominio D4 se muestran en la **Figura 2**. En ella se puede apreciar que los niveles más altos de concentración en el municipio de Madrid están localizados en el centro de la ciudad y muy especialmente en zonas relacionadas con las vías principales de comunicación tales como el eje de la Castellana, Calle 30 y M-40, en las cuales se concentra gran parte del tráfico del área de estudio. La concentración media anual de NO₂ en el área total del Municipio de Madrid es de 17,2 µg/m³. El valor para el conjunto del municipio es relativamente bajo debido principalmente a que en el noroeste del Municipio (Distrito Fuencarral - El Pardo) no existen poblaciones ni vías de comunicación importantes, hecho que contribuye a bajar la media en todo el municipio. No obstante, puede observarse la existencia de importantes gradientes espaciales dentro del municipio con niveles máximos cercanos a 50 µg/m³. Debe tenerse presente que los resultados se han elaborado en base a simulaciones con una resolución máxima de 1 km², lo que significa que dentro de cada celda, a su vez pueden existir importantes variaciones y contener, por tanto, valores sustancialmente más elevados en puntos concretos.

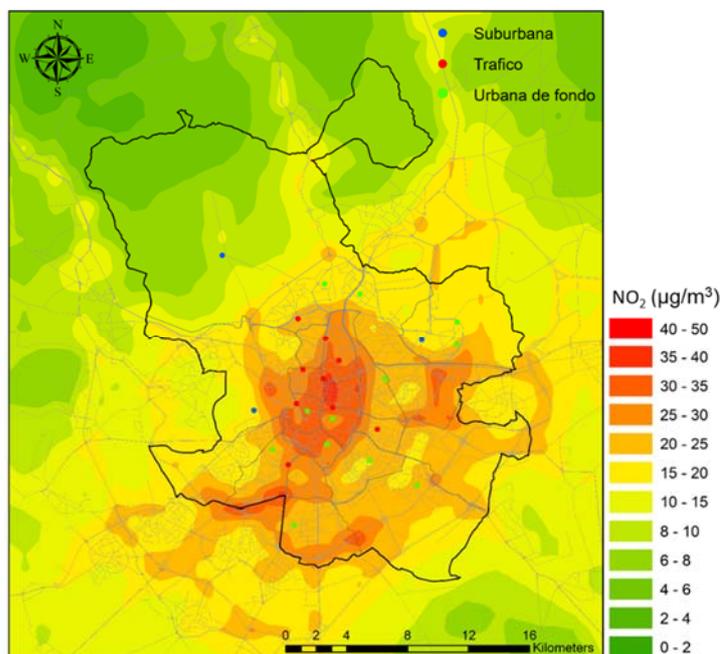


Figura 2. Concentración media anual de NO₂ predicha para el año 2012

Los distintos aportes a esta concentración se muestran en la **Figura 3**. En ella se observa que la contribución para el conjunto del municipio de Madrid está dominada por las fuentes locales (71,7%), principalmente por el tráfico rodado, que aporta 9,2 µg/m³ lo que equivale al 53,3% de las contribuciones totales y al 74,4% sobre las fuentes locales, es decir, las emitidas dentro del propio municipio de Madrid. El resto de fuentes locales tienen un aporte mucho menos significativo. El segundo sector en importancia según los resultados, sería el residencial/comercial/institucional (RCI) con una aportación del 5,9% sobre las fuentes totales, seguido por el aeropuerto Adolfo Suarez Madrid-Barajas con un 2,7% (la variabilidad dentro del municipio es especialmente alta al tratarse de un foco puntual, según se puede comprobar en la **Figura 4f**) y la industria con una aportación mínima globalmente (0,3%). Por otro lado, en relación con las contribuciones externas al Municipio de Madrid, predomina especialmente el aporte regional (Comunidad de Madrid) con una contribución del 23,6% (4,1 µg/m³), mientras que la contribución nacional e internacional representan en su conjunto menos de 1 µg/m³. Dado que la denominación regional se refiere fundamentalmente a los municipios que conforman el área metropolitana de Madrid, cabe esperar que su estructura de contribución interna sea similar a la descrita para Madrid y esté, a su vez, dominada por el tráfico rodado. Este resultado es bastante similar al obtenido en estudios previos (que tomaban el año 2007 como referencia), si bien

la contribución local es ligeramente inferior, al igual que la importancia relativa del tráfico, que se ve ligeramente reducida.

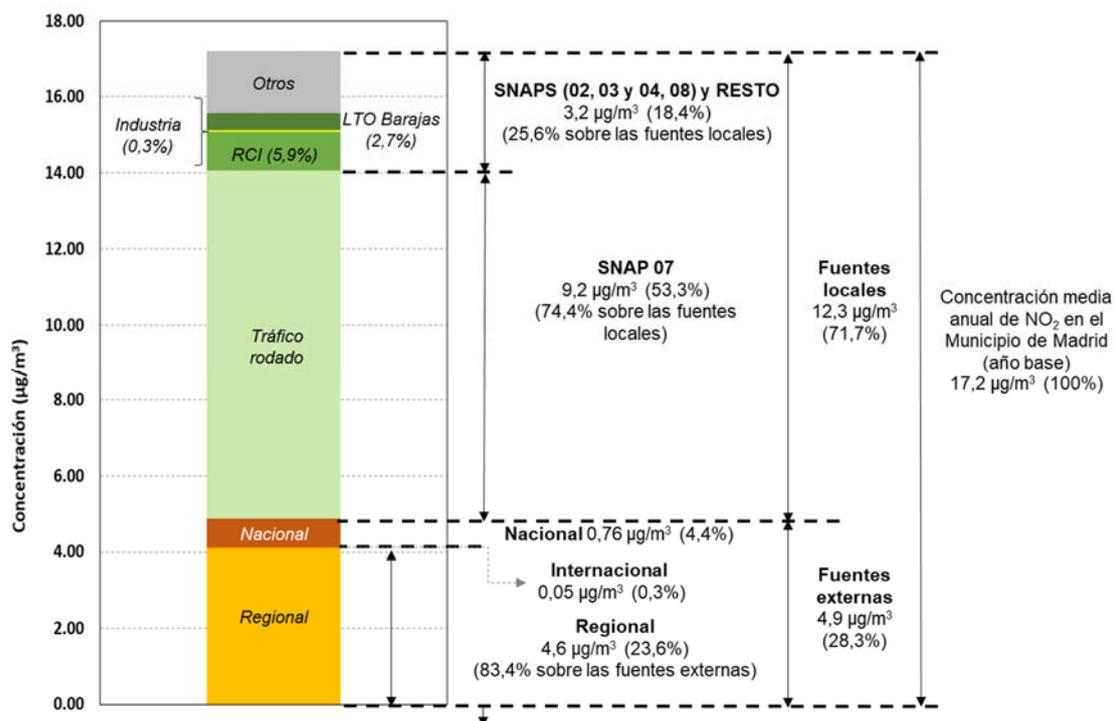


Figura 3. Resumen de resultados del análisis de contribución de fuentes (concentración media anual de NO₂ para el conjunto del Municipio de Madrid)

En la **Figura 4**, se muestran mapas con la contribución de los principales sectores analizados a la media anual de NO₂ dentro del municipio. En la **Figura 4a** puede comprobarse que los niveles de NO₂ en Madrid se asocian fundamentalmente a fuentes locales, con valores de hasta un 90% en el centro de la ciudad. Como es lógico, la contribución regional (**Figura 4b**) presenta un comportamiento inverso; su importancia crece con la distancia al centro como puede apreciarse claramente en la zona noroeste (El Pardo) debido al menor peso que en esa zona tienen las aportaciones de sectores locales.

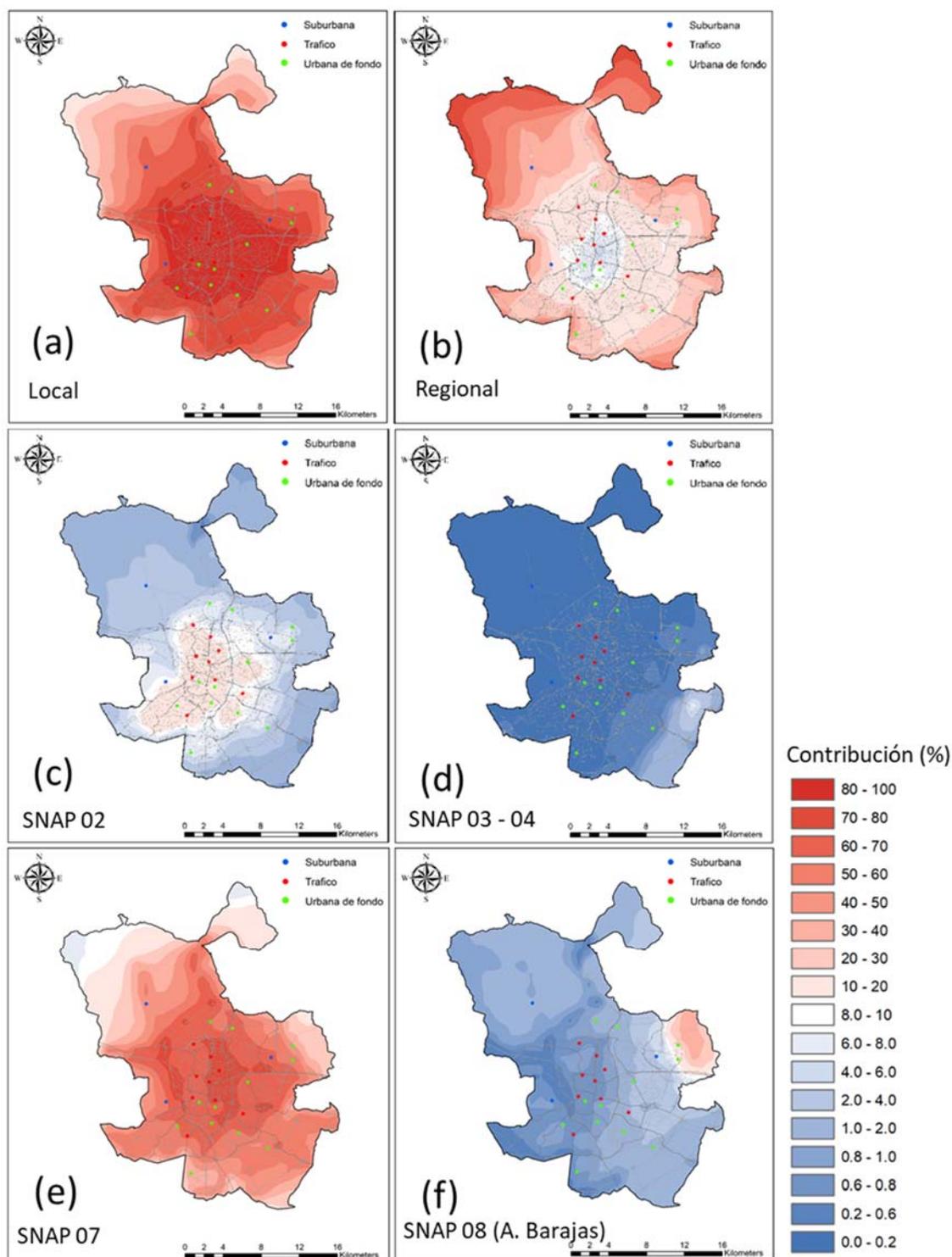


Figura 4. Contribución a la media anual de NO_2 para el año 2012 en el municipio de Madrid, (a) local, (b) regional, (c) SNAP 02, (d) SNAP 03-04, (e) SNAP 07, (f) SNAP 08 (tráfico aéreo).

La **Figura 4c**, muestra la aportación del sector RCI; se puede observar que las máximas contribuciones suceden en el centro de la ciudad, con valores máximos del orden del 15%. Esto es debido a que las emisiones de este sector procedentes de actividades de combustión de carácter no industrial, tiene su origen mayoritario en las calderas de calefacción, y por ello son mayores en el centro de la ciudad donde existe una mayor densidad de población. Como media para el conjunto del municipio de Madrid, el sector RCI contribuye con un 5,9% a la media anual de NO₂. Dado el carácter estacional de esta fuente, existe una variación a lo largo del año, localizándose la contribución máxima en el periodo invernal, cuando su importancia relativa puede llegar a duplicarse.

En lo que respecta a la contribución de las emisiones de carácter industrial (SNAP 03 y 04) mostrada en la **Figura 4d**, es poco relevante con carácter general, situándose en un 0,3% para el total de municipio de Madrid. En contra de lo que sucede con el tráfico, esta contribución es muy inferior a la que el sector tiene en términos de emisiones de NO_x (6%). Claramente, las mayores contribuciones se localizan en la zona este y sureste del municipio, donde existe un mayor número de fuentes de origen industrial, alcanzándose contribuciones máximas cercanas al 8%.

En cuanto a las contribuciones del tráfico (**Figura 4e**) son máximas en el centro de la ciudad, y más concretamente sobre las vías principales, Paseo de la Castellana, Calle 30 etc., con valores de hasta un 70% de la concentración total de NO₂. También a las afueras del núcleo urbano las contribuciones son importantes sobre las principales autopistas, como por ejemplo la A-1 o la A-6, con valores entre el 50%-65%.

Por último, en la **Figura 4f**, se muestra la contribución del tráfico aéreo asociado al aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas a los niveles de concentración medios de NO₂. Se aprecia que en las zonas más próximas al aeropuerto la contribución puede llegar a ser de hasta 35%. No obstante, disminuye rápidamente con la distancia a la fuente, contribuyendo con el 2,7% de la media anual de NO₂ en el conjunto del término municipal de Madrid.

4.1.2. Material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5})

En este apartado se tratan conjuntamente ambos contaminantes (PM₁₀ y PM_{2.5}) debido a que su comportamiento tanto espacial como a nivel de contribuciones es similar. En la **Figura 5** se muestra la media anual de ambos contaminantes según las simulaciones a mesoescala realizadas. Se observan unos niveles similares, con máximos en ambos casos de 10 -15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como media anual. Estos máximos se dan en el centro de la ciudad y sobre las principales vías de comunicación del área de estudio, Calle 30, M-40, M-50 y algunas de las autopistas más importantes (A1, A5, A-6), lo que apunta a la influencia que el tráfico rodado tiene sobre estos contaminantes. También cabe destacar el área donde se ubican Leganés, Alcorcón y Getafe, que en la práctica conforman un continuo urbano con Madrid. Se observa que los patrones espaciales son muy parecidos al del NO₂ debido básicamente al peso que las emisiones del tráfico tienen sobre ambos contaminantes (partículas y NO₂). Típicamente, el sistema de simulación presenta mejor resultado para el PM_{2.5} ya que sus niveles dependen en menor medida de fuentes fugitivas que pueden no estar correctamente representadas en los inventarios de emisiones y el propio sistema de transporte-química. De este modo, debe entenderse que los resultados para la fracción más fina son más fiables que los correspondientes al PM₁₀.

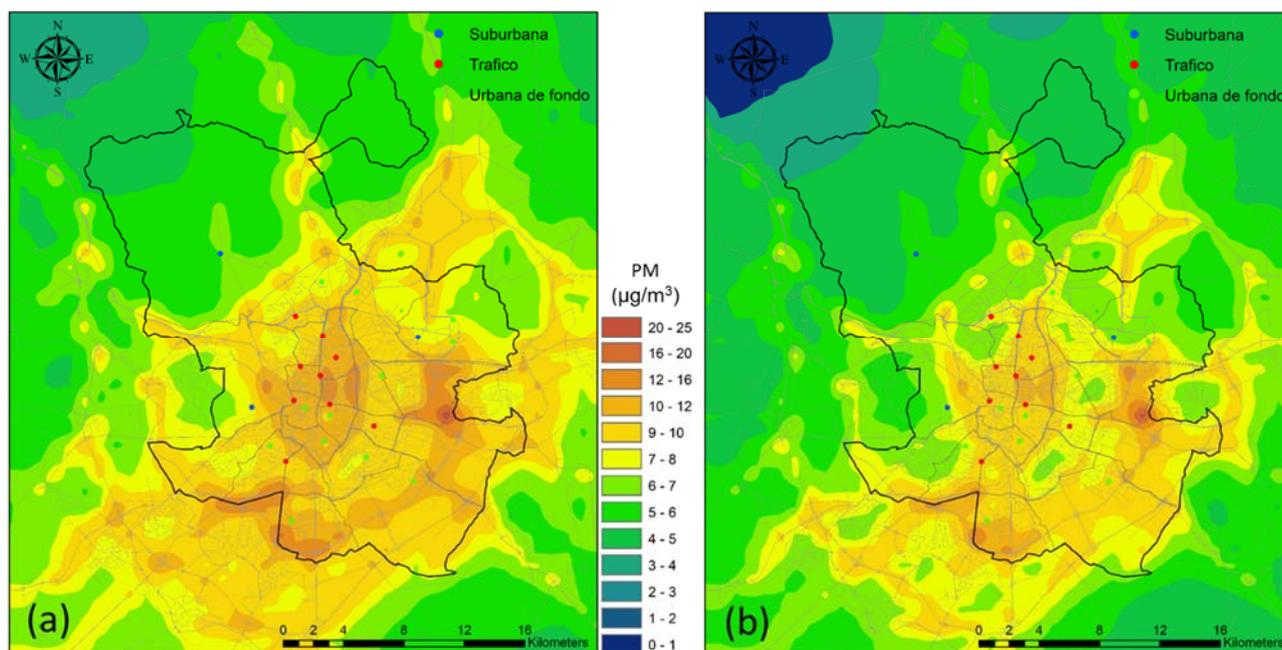


Figura 5. Concentración media anual predicha de PM₁₀ (a) y de PM_{2.5} (b) para el año 2012

A continuación, se muestran los resultados del análisis de contribución de fuentes para la concentración media anual de partículas PM_{10} (**Figura 6**) y $PM_{2.5}$ (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) en el Municipio de Madrid, de forma análoga al anteriormente discutido para el NO_2 .

La principal diferencia en el caso de las partículas es que el aporte exterior aumenta considerablemente como media en el municipio de Madrid, llegando a contribuciones superiores al 50% en ambos casos. En ambos casos destaca principalmente la contribución regional ($PM_{10} \approx 22\%$; $PM_{2.5} \approx 16\%$) y nacional ($PM_{10} \approx 23\%$; $PM_{2.5} \approx 33\%$). Pese a que los procesos de depósito húmedo y seco son mucho más efectivos para eliminar las partículas de la atmósfera, su tiempo de vida medio en la atmósfera es sustancialmente menor que la de gases muy reactivos como es el caso de los NO_x . Esto tiene implicaciones directas a nivel de gestión e implica que el margen de maniobra del Ayuntamiento para reducir la concentración de material particulado es menor que en el caso del NO_2 .

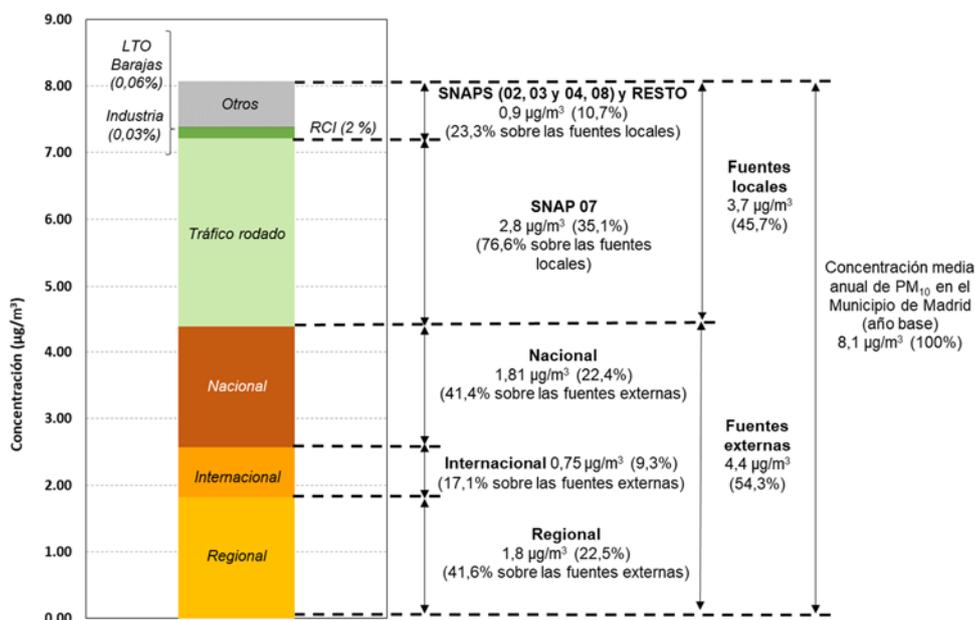


Figura 6. Resumen de resultados del análisis de contribución de fuentes (concentración media anual de PM_{10} para el conjunto del Municipio de Madrid)

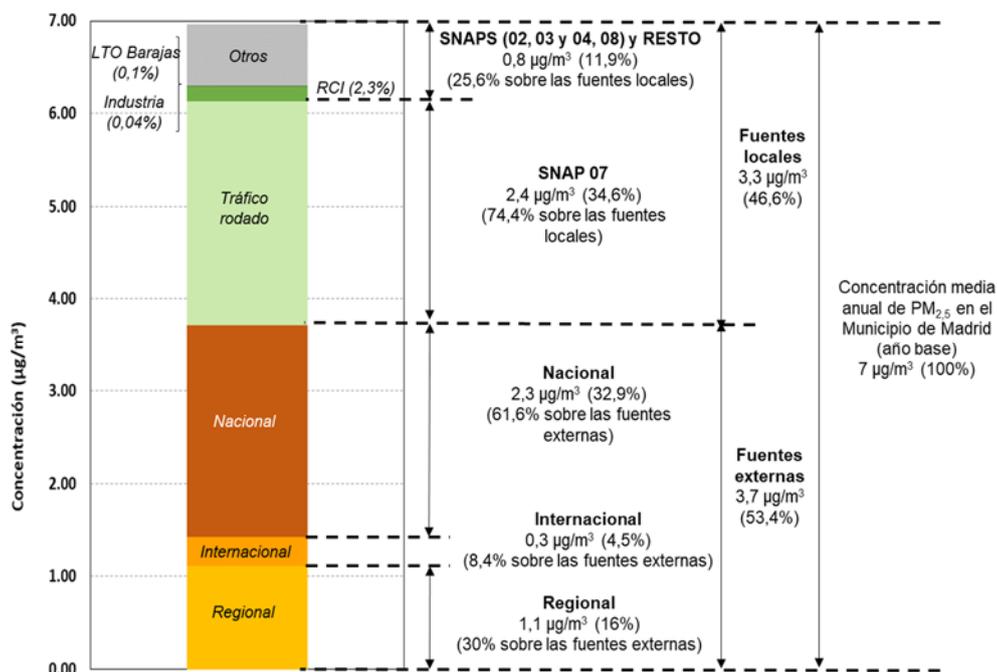


Figura 7. Resumen de resultados del análisis de contribución de fuentes (concentración media anual de $PM_{2,5}$ para el conjunto del Municipio de Madrid)

En cuanto a las fuentes locales ($\approx 46\%$), presentan una contribución dominada por del tráfico rodado, en torno al 35% ($PM_{10} \approx PM_{2,5}$), tal y como se observa en ambas figuras. Por otro lado, el sector RCI tiene una aportación menos significativa a las concentraciones de PM con una contribución aproximadamente del 2%. La suma de las aportaciones del tráfico aéreo y el sector industria no superan el 1%, por el contrario, el sector “otros” (mayoritariamente la maquinaria móvil no de carretera y el sector residuos), contribuye con aproximadamente un 11%.

Con el propósito de representar la distribución espacial de estas contribuciones, en la **Figura 8** se muestran los mapas del municipio de Madrid con las contribuciones de los principales sectores o áreas geográficas que intervienen en los niveles de concentración de partículas finas ($PM_{2,5}$) en el área de estudio. En este caso se muestran todas las áreas geográficas de aporte exterior implicadas por considerarse uno de los principales aportes en su conjunto (53%). En la **Figura 8a** se muestran las contribuciones locales, como se ha señalado antes representan el 47% aproximadamente. De esta distribución se desprende que el principal sector que contribuye al aumento de los niveles de partículas es el tráfico, cerca del 75% del total de las fuentes locales. En cuanto a las contribución regional (**Figura 8b**) esta muestra la misma estructura que el NO_2 , disminuyendo su contribución en el centro de la ciudad, donde lógicamente otras fuentes tienen una influencia mayor. Este mismo análisis se podría

realizar con las contribuciones nacionales (**Figura 8c**) e internacionales (**Figura 8d**), donde las mayores contribuciones se dan en el borde del municipio especialmente en zonas donde otros sectores contribuyen menos. Cabe señalar que la influencia internacional es probablemente mayor que la mostrada en este análisis, ya que los dominios de simulación no incluyen regiones de origen relevantes como el desierto del Sáhara. Aun así, en el centro de la ciudad, la contribución nacional e internacional alcanza aproximadamente un 15% y un 6% respectivamente. Por lo que respecta a las fuentes locales, en la **Figura 8e** se muestra la distribución espacial de las contribuciones de la SNAP 02 mientras que en la **Figura 8f** se muestran las de la SNAP 07, en ambos casos los valores más altos se localizan en el centro de la ciudad, con un 8%-10% la SNAP 02 y un 55%-60% la SNAP 07 con respecto al total de las fuentes del dominio. De forma similar al NO₂, el resultado identifica claramente al tráfico rodado como principal objetivo para la mejora de la calidad del aire en Madrid.

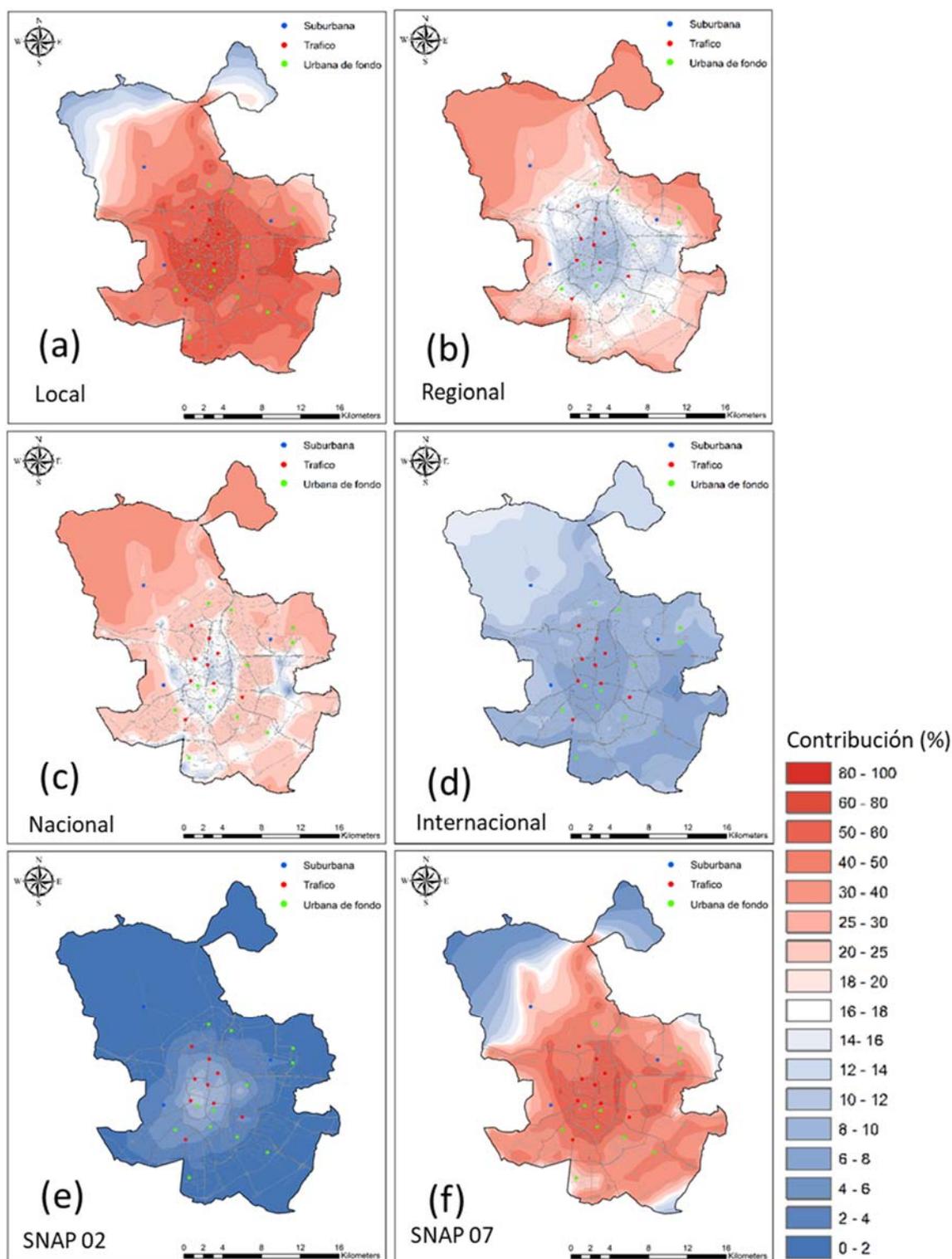


Figura 8. Contribución a la media anual de $PM_{2.5}$ para el año 2012 en el municipio de Madrid, (a) local, (b) regional, (c) nacional, (d) internacional, (e) SNAP 02, (f) SNAP 07.

4.2. Análisis de contribución de fuentes en las estaciones

4.2.1. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

En la **Figura 9** se recogen los resultados del estudio de contribución de fuentes para todas las estaciones de calidad del aire caracterizadas como de fondo urbano del Ayuntamiento de Madrid. La ubicación de este tipo de estaciones intenta representar la concentración que se puede encontrar en cualquier punto de la ciudad y que, en principio, es la más relevante a efectos de la exposición de la población a los distintos contaminantes atmosféricos. No obstante, puede observarse que en general los valores de concentración en las distintas estaciones están muy dominados por el aporte debido al tráfico rodado (SNAP 07), variando entre el 35% (estación de Villaverde) y el 68% (estaciones de Retiro o Arturo Soria). A continuación, la contribución más importante es la del sector RCI (SNAP 02), que varía entre el 16% de la estación de Farolillo y el 4% de la estación de Ensanche de Vallecas (la influencia es mayor cuanto más en el interior del núcleo urbano este localizada la estación, tal y como se puede apreciar en la **Figura 4c**).

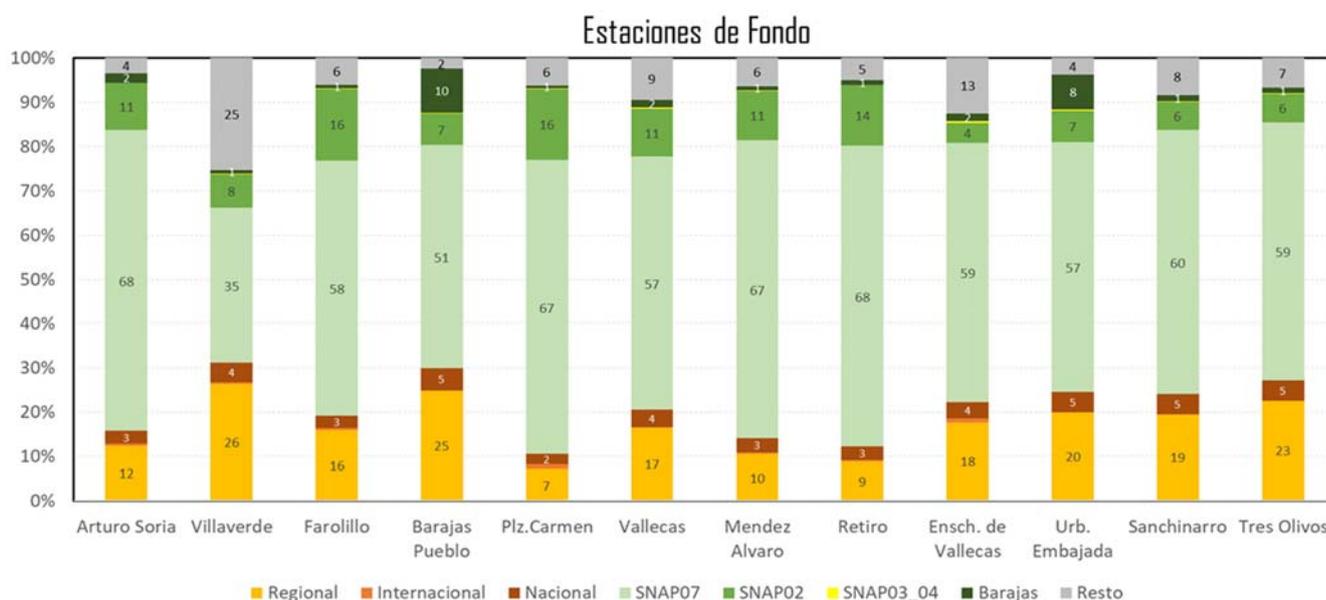


Figura 9. Contribución a la media anual de NO₂ para las estaciones de fondo (año 2012)

Por lo que respecta a la influencia del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas (SNAP 08), el régimen de vientos y sobre todo la proximidad de las estaciones es determinante; por ello, las estaciones de Barajas Pueblo y Urbanización Embajada son las estaciones más expuestas a dicha

fuelle, con una contribución del 10% y 8% respectivamente. En cuanto al sector de la industria (SNAP 03 y 04) apenas tiene influencia en los niveles de concentración, siendo el máximo del 0.5% en la estación de Ensanche de Vallecas, debido principalmente a su proximidad (4km al noreste de la estación) de una instalación relacionada con la extracción de minerales. Otras fuentes emisoras locales se agrupan en la categoría “Otros”, donde se engloban las contribuciones de la maquinaria móvil no de carretera y el sector residuos, principalmente. En esta categoría cabe destacar las estaciones de Villaverde y Ensanche de Vallecas, donde la contribución de esta categoría alcanza un 25% y un 13% respectivamente. Estos valores tan altos se deben principalmente a la proximidad de la EDAR Sur y Butarque (SNAP 09), y más concretamente al consumo de gas natural procedente de los motores utilizados para el secado de lodos cuyas emisiones de NOx pueden llegar a ser muy altas. Esta contribución puede no ser representativa en la actualidad ya que en 2014 cesó la actividad en las plantas de secado de lodos de las EDAR Sur y Butarque según ediciones posteriores del inventario de emisiones del Ayuntamiento de Madrid. Las contribuciones exteriores también son muy importantes, sobre todo procedentes del ámbito nacional y regional. Estaciones muy próximas al límite del municipio obviamente están más influenciadas por este tipo de contribuciones, destacando las estaciones de Villaverde y Barajas Pueblo, con un 30% de aporte exterior.

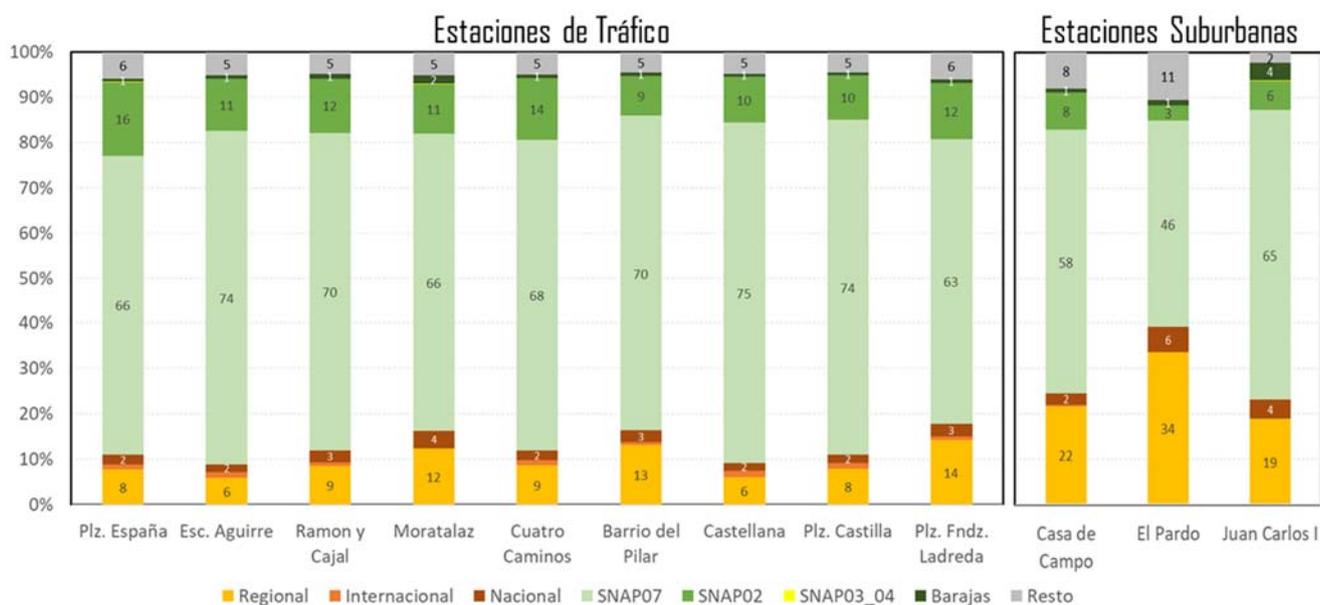


Figura 10. Contribución a la media anual de NO₂ para las estaciones de tráfico y estaciones suburbanas (año 2012)

En la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. se presenta la misma información pero en este caso el estudio de contribución de fuentes se centra en las nueve estaciones de tráfico y las tres estaciones suburbanas incluidas en la red de vigilancia de la calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid.

Analizando en primer lugar las estaciones de tráfico, se observa que la mayor contribución a los niveles de concentración de NO₂ se debe al tráfico rodado, ya que es la principal fuente emisora de óxidos de nitrógeno en el municipio de Madrid y en particular en las estaciones bajo esta clasificación. Su contribución, como era de esperar, es en general mayor que las estaciones de fondo urbana, con contribuciones entre el 63% para la estación de la Plaza de Fernández Ladreda y el 75% para Castellana. El sector RCI presenta contribuciones a los niveles de concentración de NO₂ entre el 9% – 16 %, siendo el valor más alto en la estación de Plaza de España. El sector industrial presenta contribuciones mínimas, inferiores al 0,2%.

La contribución del aeropuerto del tráfico aéreo (SNAP 08) es menor del 2% en todas las estaciones, siendo la estación de Moratalaz la que registra un mayor aporte (2%), debido a una mayor proximidad a la fuente. El resto de las fuentes emisoras locales juntas no contribuyen más de un 5%-6% a los niveles de NO₂ como media anual.

La contribución de las fuentes externas se cifra en el 8% - 17%, siendo el aporte regional el más relevante según se ha comentado con anterioridad. Son las estaciones de Moratalaz, Fernández Ladreda y Barrio del Pilar las más influenciadas por estos aportes externos, pues entre las estaciones de tráfico son las más lejanas al centro urbano de Madrid.

Por lo que respecta a las estaciones suburbanas, representadas también en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., se observa claramente un cambio en las proporciones de las que los distintos sectores son responsables, aumentando la contribución de las fuentes externas (hasta un 40% en El Pardo), y muy especialmente las regionales (34%). No obstante, la influencia de las emisiones procedentes de la SNAP 07, sigue estando muy presente, oscilando su contribución entre el 46% - 65%. Cabe destacar la influencia del aeropuerto en los niveles de NO₂ registrados en la estación de Juan Carlos I (4% como media anual).

4.2.2. Material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5})

En la **Figura 11** se ilustra la contribución de los distintos sectores estudiados a los niveles de concentración media anual de PM₁₀ en las estaciones que miden este contaminante. A primera vista,

se observa que el aporte exterior aumenta considerablemente, con contribuciones que varían entre 30% (Escuelas Aguirre, estación de tráfico) y el 55% (Tres Olivos, estación de fondo) pese a las limitaciones apuntadas en relación a la representación de diversas fuentes y procesos relevantes para explicar los niveles de concentración de este contaminante.

En el caso de la estación suburbana de la Casa de Campo, el porcentaje de aportación externa y local a los niveles de concentración de PM₁₀ son prácticamente iguales, 52% (externa) 48% (local). No obstante, a nivel de fuente individual, la mayor contribución sigue procediendo del tráfico rodado (37%).

Como es lógico conforme a su denominación, en las estaciones de tráfico la contribución del SNAP 07 aumenta ligeramente con respecto a los otros tipos de estaciones, entre el 46% y el 61%. A pesar de ello, la componente externa sigue siendo importante; por ejemplo, en la estación de Cuatro Caminos y Moratalaz la contribución exterior a los niveles de PM₁₀ son de un 37% y un 45% respectivamente. Las contribuciones de la combustión en el sector RCI oscilan entre un 4% y un 9%, siendo máximo en la estación de Cuatro Caminos.

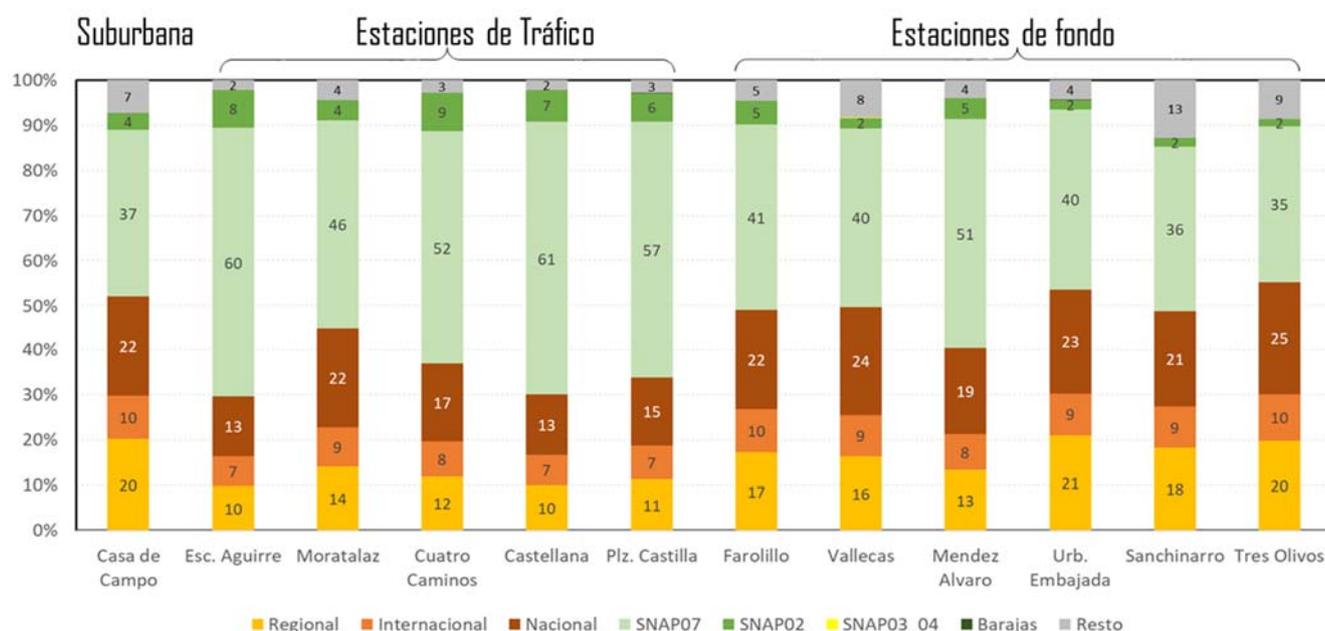


Figura 11. Estudio de contribución de fuentes (PM₁₀) para las estaciones suburbanas, estaciones de tráfico y estaciones de fondo (año 2012)

En las estaciones de fondo, en torno al 50% de los niveles de concentración de PM₁₀ son debidos a aportes procedentes del exterior (nacional ≈22% y regional ≈17%). Pese a que la simulación no incluye el desierto del Sáhara, ampliamente documentado como una fuente importante de PM₁₀ en el

centro peninsular, se estima que hasta el 10% proviene de fuera de España. La influencia del tráfico rodado en este tipo de estaciones es menor, no obstante, se alcanzan valores en torno al 40-50%. También se observa que las contribuciones del sector “Otros” es mayor que el sector RCI, alcanzándose valores en la estación de San Chinarro de hasta un 13%.

En la **Figura 12** se muestra la contribución de fuentes para los puntos en los que se ubican las siete estaciones de calidad del aire del Ayuntamiento de Madrid que miden $PM_{2.5}$ (de ellas, cuatro son estaciones de tráfico, dos son estaciones de fondo urbano y la última suburbana). A grandes rasgos la estructura es similar a la mostrada para el PM_{10} , si bien se observa que la contribución nacional es mayor. Para explicar este fenómeno debe considerarse que además de los procesos de transporte físico, una parte muy importante de las partículas $<2.5\mu m$ se generan mediante procesos secundarios que dependen de diversas fuentes tanto biogénicas como antropogénicas distribuidas por todo el país. Para precisar esta circunstancia, sería necesario reproducir este análisis para las distintas fracciones del aerosol fino (carbono elemental, aerosol orgánico secundario, etc.). Dado el objetivo de este informe, no es preciso entrar a discutir con detalle estos procesos, que deben ser abordados en estudios específicos.

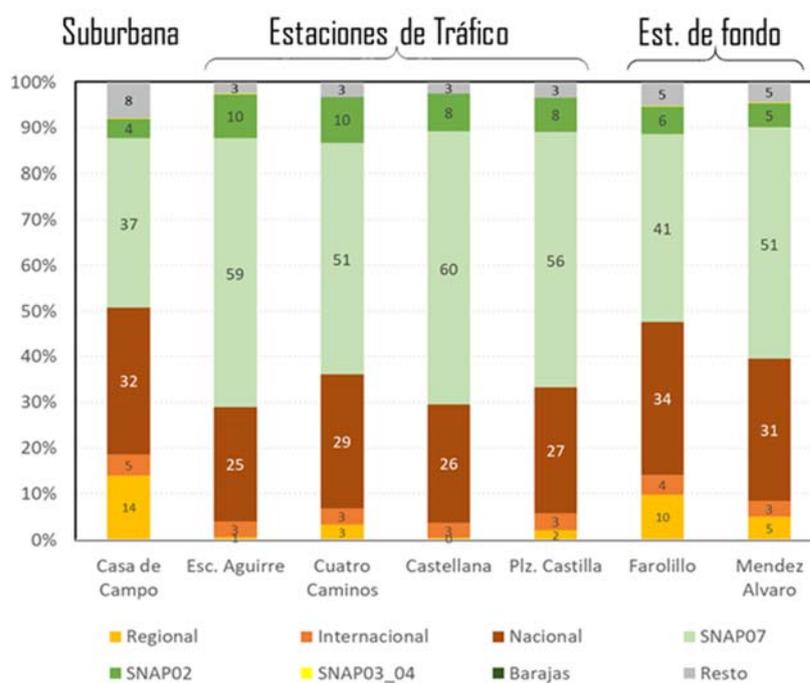


Figura 12. Estudio de contribución de fuentes ($PM_{2.5}$) para las estaciones suburbanas, estaciones de tráfico y estaciones de fondo (año 2012)

5. Resumen y conclusiones

En el presente estudio se sintetizan los resultados relativos a la contribución de fuentes realizada a partir del análisis de técnicas de simulación a mesoescala de la concentración de los principales contaminantes relevantes para la calidad del aire en Madrid (NO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$). Los sectores analizados y sus contribuciones se resumen en la **Tabla 3**. En ella se muestra por un lado las contribuciones de cada sector con respecto a la concentración total, y por el otro con respecto al total de las fuentes locales, o con respecto al total de las fuentes externas, si lo que interesa analizar es el ámbito geográfico de la influencia sobre la calidad del aire.

Tabla 3. Resumen del análisis de contribución de fuentes para la concentración media anual de NO_2 , y $\text{PM}_{2.5}$ como media en el total del Municipio de Madrid

Sectores	Contribución NO_2 (%)		Contribución $\text{PM}_{2.5}$ (%)	
	Respecto al total	Respecto a las fuentes locales /externas	Respecto al total	Respecto a las fuentes locales /externas
SANP 02	5,9	8,2	2,3	5,0
SNAP 03 y 04	0,3	0,4	< 0,1	0,1
SNAP 07	53,3	74,4	34,6	74,4
SNAP 08*	2,7	3,7	0,1	0,2
Otros	9,5	13,3	9,5	20,4
<i>Aporte local</i>	<i>71,7</i>	<i>100,0</i>	<i>46,6</i>	<i>100,0</i>
Regional	23,6	83,4	16,0	30,0
Nacional	4,4	15,5	32,9	61,6
Internacional	0,3	1,1	4,5	8,4
<i>Aporte externo</i>	<i>28,3</i>	<i>100,0</i>	<i>53,4</i>	<i>100,0</i>

Los resultados obtenidos son similares a los del estudio previo basado en el año 2007 para el NO_2 , que apuntan al tráfico rodado como principal contribuyente a los niveles medios anuales de concentración. En el caso del material particulado, las contribuciones externas son mucho más relevantes, lo que reduce el margen de actuación para la reducción de sus niveles por parte del

Ayuntamiento. No obstante, el tráfico es también el principal causante de los niveles de partículas en inmisión de entre las fuentes locales. Las medidas más relevantes deben ser, por tanto, las que afecten al tráfico rodado (SNAP 07), por ser el que más contribuye, aproximadamente un 75% con respecto al resto de sectores que emiten dentro del municipio de Madrid, tanto para los óxidos de nitrógeno como para partículas. Cabe señalar que los esfuerzos de reducción en este sector son particularmente efectivos, ya que la contribución en términos de emisiones es mucho menor que en términos de calidad del aire. Esto se debe a las condiciones de emisión. Los compuestos liberados en los procesos de combustión de los sectores industriales y RCI se emiten a cierta altura y con un momento cinético y térmico que facilitan su dispersión en la atmósfera. De este modo, el beneficio potencial para la salud por tonelada reducida es máximo en el caso del tráfico rodado.

Esto no es óbice para no actuar sobre otros sectores. Dentro de las fuentes locales, el siguiente sector más relevante es el Residencial, Comercial e Institucional (SNAP 02), este contribuye a los niveles de concentración de NO_2 del municipio en un 8% y a los niveles de partículas ($\text{PM}_{2.5}$) en un 5% aproximadamente. Sobre este sector cabrían medidas relacionadas con la reducción del consumo energético y con la renovación de equipos de combustión que minimicen la generación y emisión de óxidos de nitrógeno (NO_x) y partículas sin obviar que además este sector es el principal emisor de gases de efecto invernadero en el término municipal (30% de los GEI como CO_2 equivalente).

A continuación, se encuentra el aporte del tráfico aéreo en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, que contribuye en un 2,7% a los niveles de NO_2 si bien su contribución al material particulado en suspensión es muy reducido.

El sector industrial (SNAP 03 y 04) es poco relevante en el ámbito de estudio, ya que su contribución a la concentración total de NO_2 es del 0,3% y prácticamente nula en lo que respecta al material particulado. No obstante, la identificación de áreas con problemas de calidad de aire de origen industrial y la implementación de medidas correctoras pueden tener influencia sobre la calidad del aire a una escala más local.

En el caso del sector “otros” donde se engloban mayoritariamente las emisiones procedentes de la maquinaria industrial, la maquinaria móvil agrícola y el sector residuos, su contribución a los niveles de NO_2 es del 13%. Para el caso de las partículas esta contribución es aún mayor, del 18% para las partículas PM_{10} y de 20% para las $\text{PM}_{2.5}$.

Las fuentes externas al municipio de Madrid también contribuyen de forma importante al aumento de los niveles de concentración de contaminantes en el municipio de Madrid, fundamentalmente para las partículas. La contribución a los niveles de concentración dentro del municipio de origen regional,

es decir, el procedente de la Comunidad de Madrid exceptuando el municipio, es del 28% para el NO_2 y del 54% para las partículas. Las aportaciones de origen nacional también son muy importantes para el $\text{PM}_{2.5}$ llegando a ser en este caso el 33% de la contribución total. Por ello es importante que otras administraciones autonómicas y nacionales implanten medidas que limiten la emisión de partículas y sus precursores.

A la vista de los resultados se puede concluir que con objeto de cumplir los valores límite de concentración de NO_2 y de material particulado (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$), las medidas más relevantes deben ser las que afecten al tráfico rodado (SNAP 07) en el conjunto del área metropolitana de Madrid (la ciudad de Madrid y los municipios adyacentes que constituyen un continuo urbano), por ser el que más contribuye a los niveles de concentración de estos contaminantes en las escalas locales y regionales. Pese a que claramente, reducir las emisiones del tráfico rodado debe ser el objetivo prioritario del Plan, también se debe actuar sobre el sector RCI y el sector “Otros”, sin obviar la relevancia y contribución de las fuentes emisoras externas al municipio, lo que la puesta en marcha de medidas por otras administraciones también pueden contribuir al cumplimiento o no de los objetivos del Plan A. Esto es especialmente importante en lo que se refiere al material particulado. Pese a que no han superado los valores límite en ninguna estación en el año de referencia, es importante reducir aún más los niveles de concentración para alcanzar los valores guía propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).