



Utilización de la modelización como apoyo en el diseño de Redes de Calidad del Aire.

Protocolo de Actuación MITERD-CIEMAT (2021-2024)

Subactividad 2.A: Análisis de la representatividad espacial de las redes de medida de la contaminación de fondo rural.

Subactividad 2.B. Desarrollo de una metodología para evaluar la representatividad espacial de estaciones de medida de la contaminación en zonas urbanas.

**Fernando Martín, Marta G. Vivanco,
Mark Theobald, Juan Luis Garrido, Victoria Gil,
Coralina Hernández, José Luis Santiago**

Unidad de Modelización Atmosférica
CIEMAT
Avda. Complutense 22, 28040 Madrid

INDICE

1. INTRODUCCION	1
2. OBJETO	2
3. REDES DE MEDIDA DE LA CONTAMINACIÓN DE FONDO RURAL EN 2022	3
4. METODOLOGIA	6
5. RESULTADOS DE REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL DE ESTACIONES INDIVIDUALES EN 2022	11
6. RESULTADOS DE COBERTURA ESPACIAL DEL CONJUNTO DE ESTACIONES EN 2022	41
7. REPRESENTATIVIDAD Y COBERTURA PLURIANUALES 2019-22 DE UBICACIONES DE ESTACIONES DE FONDO RURAL	47
8. ANALISIS DE PERSISTENCIA DE AREAS DE REPRESENTATIVIDAD	68
9. ANALISIS DE REDUNDANCIA DE ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE	80
10. METODOLOGIAS PARA EVALUAR REPRESENTATIVIDAD DE ESTACIONES URBANAS	91
11. CONCLUSIONES	96
AGRADECIMIENTOS	101
REFERENCIAS	102

1. INTRODUCCION

La estimación de la representatividad espacial de estaciones de calidad del aire es un tema de gran importancia porque permite asignar la validez de las mediciones en las estaciones a un territorio circundante. La definición de una metodología reconocida y aceptada es un tema de discusión y trabajo dentro de FAIRMODE (Forum for Air Quality Modelling in Europe). En 2015 y 2016, se llevó a cabo en dicho foro un ejercicio de intercomparación de distintas metodologías para calcular la representatividad espacial de estaciones de calidad del aire en Amberes (Bélgica) (Martín et al, 2015 y Kracht et al, 2017). Se pudo comprobar la diversidad de metodologías, aunque la mayoría están basadas en criterios de semejanza de concentración, es decir, que la concentración en el área de representatividad espacial de una estación de calidad del aire debe estar dentro de un intervalo de un más/menos un porcentaje de la concentración medida en dicha estación. Este porcentaje oscila entre un 10 a un 30% habitualmente. Para poder delimitar con precisión el área de representatividad, se debe contar con buena información sobre cómo se distribuye la concentración de contaminantes en el territorio más o menos cercano a la estación. Lo ideal sería disponer de datos medidos de concentración de contaminantes de buena calidad, pero eso supondría un despliegue enorme de equipos de medición, lo que, incluso utilizando sensores de bajo coste, es bastante complicado. La opción más utilizada entonces es la modelización, ya que los modelos de calidad del aire bien calibrados y evaluados pueden proporcionar un mapa muy detallado de la concentración de contaminantes alrededor de la estación y de una buena calidad.

Actualmente dentro de grupo de trabajo WG8 (Exposure & exceedance indicators and network optimization) de FAIRMODE, se están realizando trabajos orientados a evaluar metodologías de cálculo del área de representatividad espacial de estaciones de calidad del aire adoptadas por diversos grupos de investigación de distintos países europeos. Recientemente, han llegado a hacer una propuesta basada en la semejanza de valores de concentración con intervalos que oscilan entre un 10 y un 20% de la concentración en la estación según sea su tipología, aunque hay todavía bastante discusión al respecto.

2. OBJETO

El presente informe muestra la aplicación de una metodología desarrollada para estimar la representatividad espacial de estaciones rurales de fondo de calidad del aire en España y analizar la cobertura espacial de las redes de estaciones para el año 2022. Esta metodología se ha aplicado también para analizar la representatividad y cobertura plurianual en el periodo 2019-2022. Estos trabajos han sido realizados por la Unidad de Modelización Atmosférica del CIEMAT, en el marco del Protocolo de Actuación entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (DGCEA) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) en Materia de Contaminación Atmosférica y Contaminantes Orgánicos Persistentes (2021-2024), y se corresponden con la Actividad 2 (Utilización de la modelización como apoyo en el diseño de Redes de Calidad del Aire) del mencionado protocolo de actuación, y en concreto a la Subactividad 2.A: Análisis de la representatividad espacial de las redes de medida de la contaminación de fondo rural.

Se ha utilizado la metodología desarrollada por CIEMAT en 2014 (Martín et al., 2014) para los contaminantes más relevantes (NO_2 , O_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y SO_2). Esta metodología fue aplicada para el mismo tipo de estaciones para los años 2008, 2009 y 2010 para NO_2 , O_3 , PM_{10} y SO_2 (Martín et al., 2014) y en el estudio realizado para los años 2019 y 2020 (Martín et al., 2021 y 2022).

En el presente informe se muestran los resultados obtenidos para la representatividad espacial de las estaciones rurales de fondo en 2022 y la cobertura total del conjunto de estaciones entendida como la suma de las áreas de representatividad anual de cada estación. Además, se han analizado las áreas de representatividad espacial plurianual de cada estación de fondo rural para el periodo 2019-2022 y la cobertura espacial plurianual del conjunto de estaciones que estuvieron operativas en alguno de esos años.

Asimismo, se informa del estado de los trabajos de desarrollo de metodologías para evaluar la representatividad espacial de estaciones en zonas urbanas.

3. REDES DE MEDIDA DE LA CONTAMINACIÓN DE FONDO RURAL EN 2022

En la España Peninsular y en las Islas Baleares, hay más de 70 estaciones rurales de fondo, que incluyen a estaciones de la Red Española EMEP/VAG/CAMP y estaciones de las distintas redes oficiales de calidad del aire de las Comunidades y Ciudades Autónomas y algunos Ayuntamientos. En el presente estudio, se han utilizado las estaciones que tenían una cobertura temporal de datos adecuada. Se han excluido aquellas que no tienen un 75% de datos válidos en estaciones con medición horaria y del 50 y 25% para PM10 y PM2.5 respectivamente en estaciones con mediciones diarias. No todas miden todos los contaminantes o no tienen cobertura temporal suficiente para todos los contaminantes, siendo el ozono el contaminante más registrado (73 estaciones) y el PM2.5 el que menos (33 estaciones). En todos los casos, el número de estaciones en 2022 ha sido inferior al de 2021. En las figuras 1 a 5, se muestran las ubicaciones de las estaciones de fondo rural que proporcionaron datos en 2022 para cada contaminante.

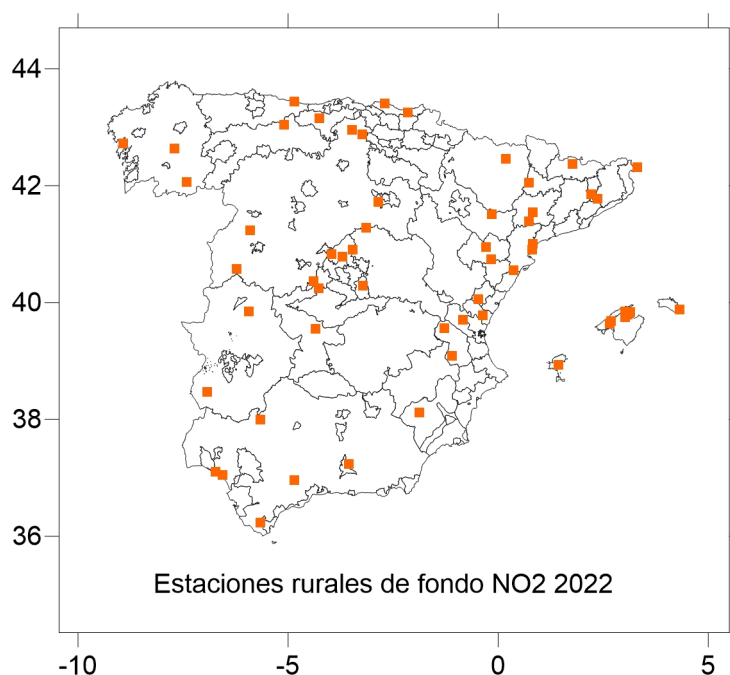


Figura 1. Mapa de las 57 estaciones rurales de fondo que registran NO₂ en 2022.

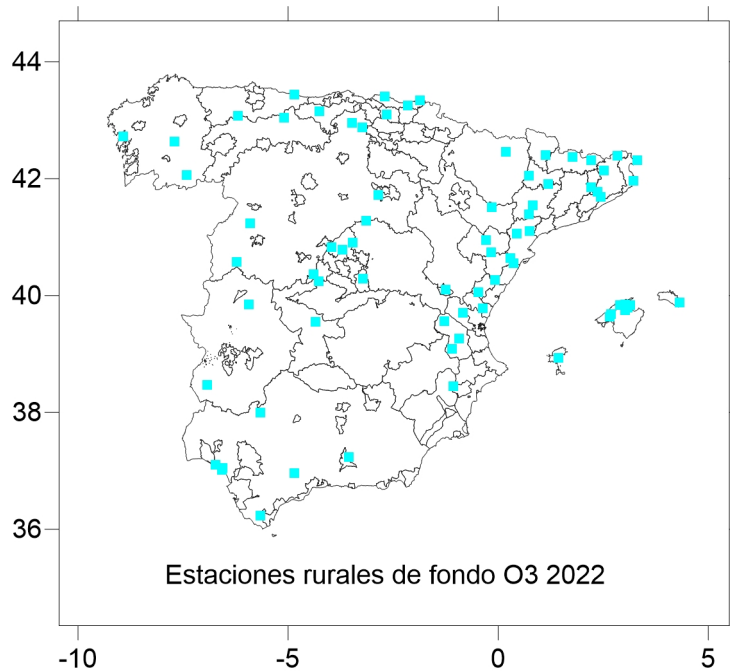


Figura 2. Mapa de las 73 estaciones rurales de fondo que registran O₃ en 2022.

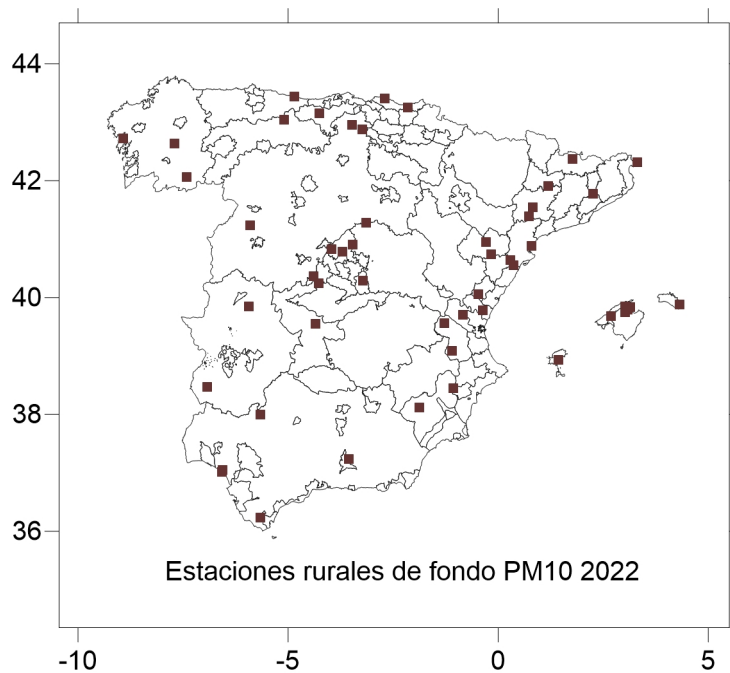


Figura 3. Mapa de las 51 estaciones rurales de fondo que registran PM₁₀ en 2022.

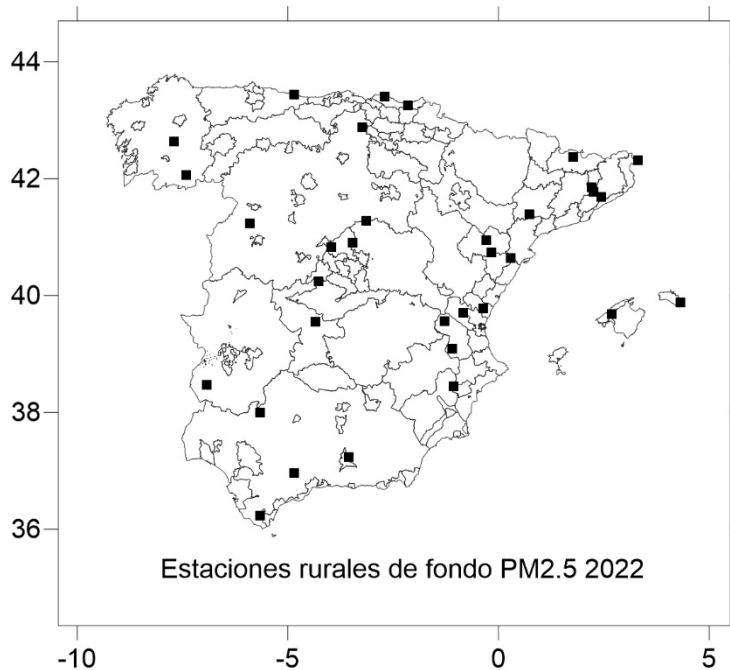


Figura 4. Mapa de las 33 estaciones rurales de fondo que registran PM_{2.5} en 2022.

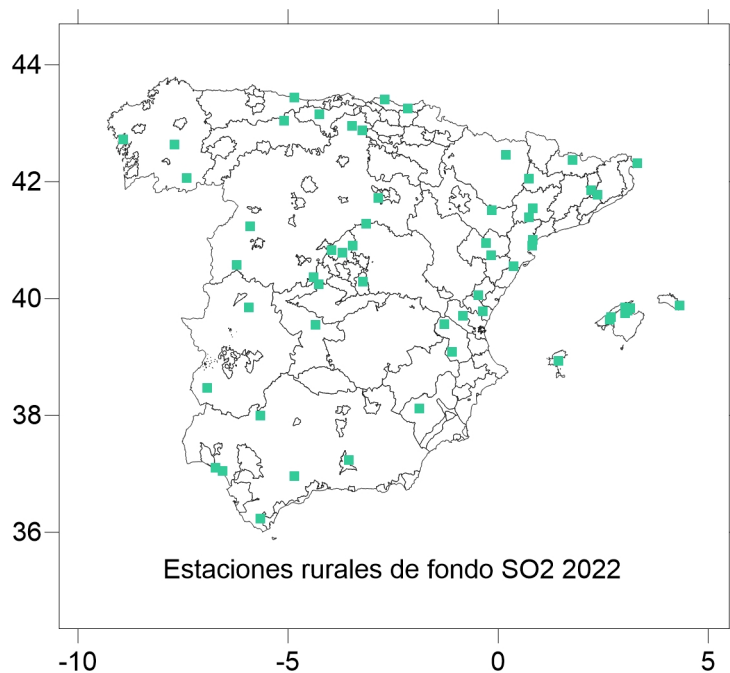


Figura 5. Mapa de las 41 estaciones rurales de fondo que registran SO₂ en 2022.

4. METODOLOGIA

La metodología utilizada para el cálculo de la representatividad espacial de estaciones rurales de fondo consiste en aplicar unos criterios con las siguientes condiciones (Martín et al, 2014, Martín et al, 2021 y 2022):

1. la concentración no varía más de un cierto porcentaje o factor de la concentración en la estación,
2. la concentración en el área de representatividad tiene la misma clasificación de evaluación de la calidad del aire. Significa, por ejemplo, que, si la concentración de contaminantes de la estación es superior al valor límite, la concentración en el área de representatividad completa también debe ser superior al valor límite, es decir, si una estación está etiquetada como de mala calidad del aire, su área de representación tendrá la misma etiqueta. Por otro lado, si la concentración es inferior al valor límite, pero superior al umbral de evaluación superior, la concentración en el área de representatividad completa también debe ser inferior al valor límite y superior al umbral superior. Los límites para calificar la calidad del aire en la legislación europea dependen de los contaminantes, pero generalmente de valor menor a mayor son el umbral inferior de evaluación (LAT), umbral superior de evaluación (UAT), valor crítico (CV) o valor límite (VL), valores de alerta (AV). Para algunos contaminantes como el ozono, existe un valor objetivo (TV) en lugar de LV, un umbral de información al público entre el TV y otro de alerta (consulte la Directiva 2008/50/CE). Esta condición, se incluyó pensando en la evaluación de la calidad del aire, de tal forma, que nos aseguremos que toda el área de representatividad tiene el mismo status de calidad del aire.
3. Se asume que el área máxima de representatividad es un círculo de 200 km de radio alrededor de la estación, que corresponde a un área de 125664 km². La Directiva 2008/50/CE establece que debe haber una estación de fondo rural por cada 100000 km² y el área de representatividad debe oscilar entre 1000 y 10000 km². Otros autores

sugieren un radio de 100 km (EC, 2011). De esta forma, se evita una extensión excesiva y poco realista del área de representatividad.

Los criterios para delimitar la representatividad espacial de las estaciones rurales de fondo se resumen en la Tabla 1. Se definieron varios conjuntos de concentración para cada contaminante y estándar de calidad del aire. Los límites de los conjuntos de concentración se eligieron teniendo en cuenta principalmente los valores límite, crítico y objetivo y los umbrales de evaluación o información a la población establecidos por la Directiva 2008/50/CE. Se utilizaron conjuntos adicionales para concentraciones inferiores a LAT o concentraciones muy bajas. Para las estaciones con concentración (ver Tabla 1) que caen en un determinado conjunto, los límites superior e inferior del intervalo de concentración alrededor de la estación se calculan aplicando el factor F a la concentración de la estación. El área de representatividad de una determinada estación contendrá todas las celdas de la cuadrícula circundante en un círculo de 200 km de radio con concentraciones que caen dentro de este intervalo. F es igual a 1.2, excepto para concentraciones muy bajas en las que se asume que F es 2. La selección de 1.2 para F se inspiró en los objetivos de calidad de datos para mediciones fijas de contaminantes de la Directiva 2008/50/CE, cuya incertidumbre oscila entre el 15% y el 25%. % dependiendo del contaminante. Blanchard et al. (1999) asumieron que el área de representatividad de una estación en un día dado se puede definir como el área alrededor de la estación que tiene concentraciones dentro del 20% de las registradas en el sitio (Santiago et al, 2013, Rivas et al., 2019). Este valor es el que más se está utilizando en distintos trabajos actualmente. Además, se aplicaron condiciones adicionales para evitar que los límites de intervalo superior o inferior excedan los límites de los conjuntos de concentración. En estos casos, el límite de intervalo superior o inferior se ha ajustado al límite superior o inferior del conjunto más cercano para asegurar una clasificación de evaluación de la calidad del aire única dentro del área de representatividad. Esto se explica gráficamente en la figura 6.

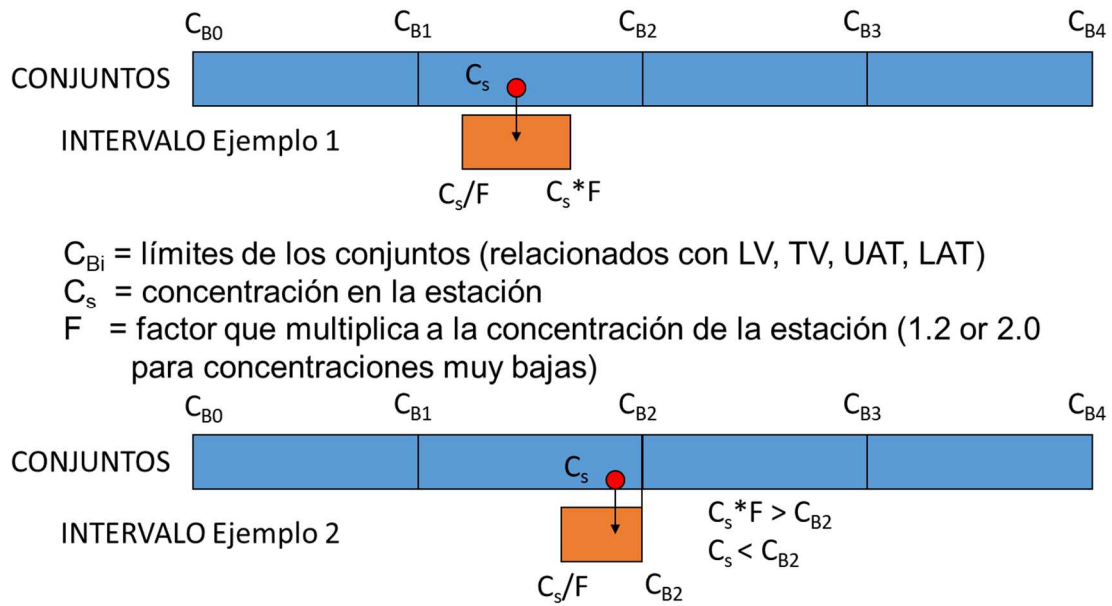


Figura 6. Explicación gráfica de cómo se calculan los límites de concentración de un contaminante para determinar las zonas que tienen una concentración similar a la de una estación de medida.

Tabla 1. Criterios para delimitar el área de representatividad espacial de estaciones rurales de fondo, para cada contaminante y cada valor estándar. I = conjuntos de concentración según los valores estándar de calidad del aire ($\mu\text{g}\text{m}^{-3}$), F = factor aplicado para fijar intervalos de concentración respecto a la concentración de la estación y L = límites ($\mu\text{g}\text{m}^{-3}$) permitidos a los valores máximo y mínimo de los intervalos de concentración de cada conjunto de concentración.

Tiempo de promedio	SO ₂			PM ₁₀			O ₃			NO ₂			PM _{2.5}		
	I	F	L	I	F	L	I	F	L	I	F	L	I	F	L
Media anual	<4	2	max≤4							<13	2	max≤13			
	≥4	1.2	min≥4	<20	1.2	max≤20				≥13	1.2	min≥13	<12	1.2	max≤12
	<8		max≤8							<26		max≤26			
	≥8	1.2	min≥8	≥20	1.2	min≥20				≥26	1.2	min≥26	≥12	1.2	min≥12
	<12		max≤12	<28		max≤28				<32		max≤32	<17		max≤17
	≥12	1.2	min≥12	≥28	1.2	min≥28				≥32	1.2	min≥32	≥17	1.2	min≥17
	<20		max≤20	<40		max≤40				<40		max≤40	<25		max≤25
	≥20	1.2	min≥20	≥40	1.2	min≥40				≥40	1.2	min≥40	≥25	1.2	min≥25
Media diaria	<25	2	max≤25												
	≥25	1.2	min≥25	<25	1.2	max≤25									
	<50		max≤50												
	≥50	1.2	min≥50	≥25	1.2	min≥25									
	<75		max≤75	<35		max≤35									
	≥75	1.2	min≥75	≥35	1.2	min≥35									
	<125		max≤125	<50		max≤50									
	≥125	1.2	min≥125	≥50	1.2	min≥50									
Media horaria	<70	2	max≤70				<90	1.2	max≤90	<50	2	max≤50			
	≥70	1.2	min≥70				≥90	1.2	min≥90	≥50	1.2	min≥50			
	<140		max≤140				<135		max≤135	<100		max≤100			
	≥140	1.2	min≥140				≥135	1.2	min≥135	≥100	1.2	min≥100			
	<210		max≤210				<180		max≤180	<140		max≤140			
	≥210	1.2	min≥210				≥180	1.2	min≥180	≥140	1.2	min≥140			
	<350		max≤350				<210		max≤210	<200		max≤200			
	≥350	1.2	min≥350				≥210	1.2	min≥210	≥200	1.2	min≥200			
						<240		max≤240	<400		max≤400				
						≥240	1.2	min≥240	≥400	1.2	min≥400				
Media octohoraria							<84	1.2	max≤84						
							≥84	1.2	min≥84						
							<108		max≤108						
							≥108	1.2	min≥108						
							<120		max≤120						
							≥120	1.2	min≥120						
						<180		max≤180							
						≥180	1.2	min≥180							

Para poder aplicar ese criterio, es necesario disponer de buenos mapas de distribución de la concentración de cada contaminante objeto de estudio. Se utilizaron los resultados de la combinación del modelo CHIMERE y mediciones que anualmente CIEMAT como soporte a la evaluación anual de la calidad del aire en España (Vivanco et al., 2020, 2021, 2022 y 2023). En las citadas referencias, se pueden ver los detalles pertinentes de dicha modelización y de la combinación con las mediciones para obtener dichos mapas.

Estos mapas se han obtenido a partir de simulaciones anuales con el modelo CHIMERE combinado con mediciones en estaciones de calidad del aire para obtener una visión más fiable de cómo se distribuyen los contaminantes. Estos mapas tienen una resolución de aproximadamente de 5x5 km². Unos mapas muestran concentraciones medias anuales, pero otros están referidos a los valores límite, críticos y objetivo establecidos por la legislación europea (Directiva 2008/50/CE) (ver Tabla 2). El tipo de valor utilizado en los mapas para cada contaminante y el tiempo promedio se basa en el número de superaciones permitidas por la Directiva. Por ejemplo, el valor límite diario de SO₂ es de 125 µg m⁻³, que no puede superarse más de 3 veces al año. Luego, el mapa de la cuarta concentración diaria máxima (durante un año) en cada celda de la cuadrícula proporciona información sobre dónde está la calidad del aire por encima o por debajo del umbral establecido por la Directiva. Se recomienda consultar el informe de Vivanco et al (2023) para más detalles.

Tabla 2. Lista de mapas de concentración calculados para varios contaminantes y para 2022. Para SO₂, los valores límite diarios y horarios pueden superarse 3 y 24 veces al año. Para PM₁₀, el valor límite diario se puede superar 35 veces al año. Para el NO₂, el valor límite horario puede superarse 18 veces al año. Por último, para el ozono, el valor objetivo puede superarse 25 veces al año en promedio de 3 años.

Contaminante	Media anual	Valor Límite diario (media diaria)	Valor Límite horario (media horario)	Valor Objetivo (media octohoraria)	Umbral de información (media horaria)
SO ₂	Si	4º valor mayor	25º valor mayor	No	No
O ₃	No	No	No	26º valor mayor	Valor máximo
NO ₂	Si	No	19º valor mayor	No	No
PM ₁₀	Si	36º valor mayor	No	No	No
PM _{2.5}	Si	No	No	No	No

5. RESULTADOS DE REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL DE ESTACIONES INDIVIDUALES EN 2022

Se muestran los histogramas de distribución de los tamaños relativos de las áreas de representatividad respecto al tamaño máximo posible que estaría limitado por las costas, fronteras con otros países y el radio máximo de 2º (equivalente aproximadamente a unos 200 km) y los resultados de la representatividad espacial de algunas estaciones en particular. En un anexo digital, se puede ver organizado en carpetas las figuras que muestran la representatividad espacial de cada estación para contaminante e indicador/tiempo de promedio (anual, diario, horario y octohorario). Las áreas de representatividad se muestran en gris en las figuras que se muestran en esta sección, estando en blanco todas las zonas que quedan fuera.

En cuanto al **NO₂**, las áreas de representatividad estimadas son bastante extensas (la mayoría son de un tamaño superior al 80% de tamaño posible), ligeramente mayores para **NO₂ anual**, con un 84% de tamaño relativo medio (figura 7), que para el **NO₂ horario**, con un 75% (Figura 8).

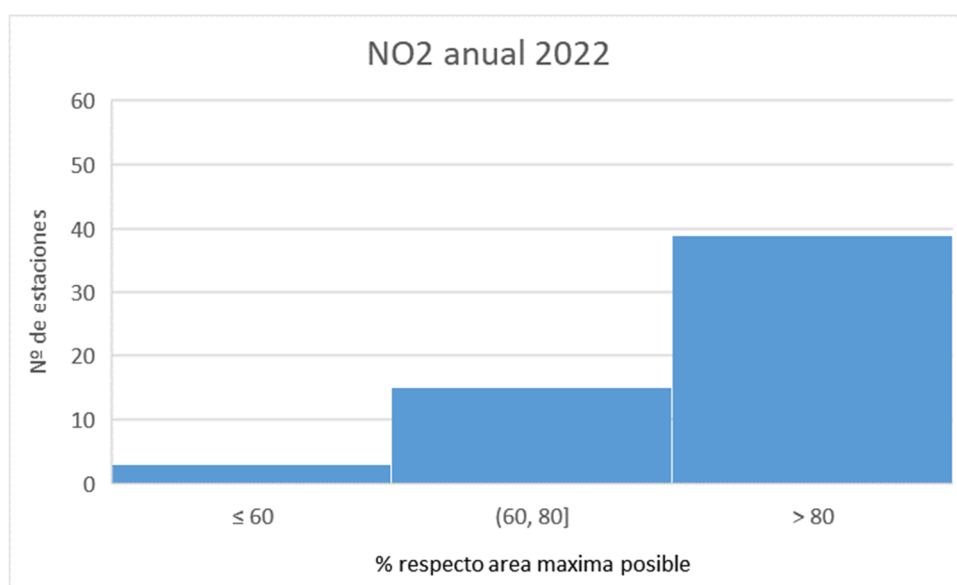


Figura 7. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el NO₂ anual.

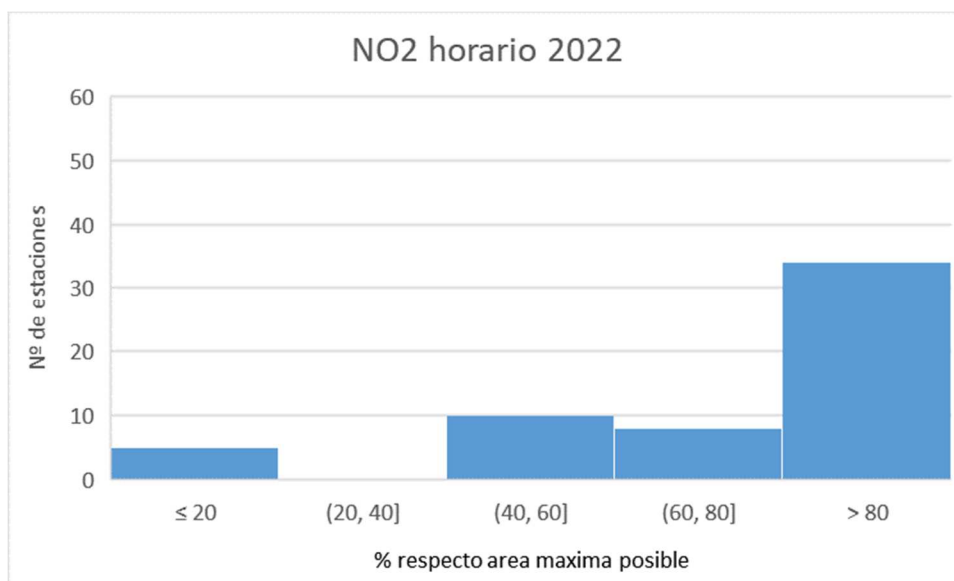


Figura 8. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el NO_2 horario

Se muestran 4 casos de áreas de representatividad espacial mostrando áreas muy grandes, grandes, medias y pequeñas para el **NO_2 anual**. En el caso de la estación de Guadalix (Figura 9), que presenta un área muy grande, se aprecia muy bien el hueco que corresponde al área metropolitana de Madrid y a la ciudad de Valladolid. La estación de San Pablo de los Montes (Figura 10) es un ejemplo de un área de tamaño medio. La estación de Noia tiene un área de representatividad media pero debido a que está limitada por el mar y la frontera con Portugal (Figura 11) y con huecos de zonas con varias poblaciones importantes. Como ejemplo de zona pequeña, se muestra la de la estación del Cabo de Creus (Figura 12), aunque también está muy afectada por la proximidad de la frontera con Francia, la costa y la zona metropolitana de Barcelona y otras poblaciones.

Se muestran para estas mismas estaciones las áreas de representatividad para el **NO_2 horario** de estas mismas estaciones (Figuras 13-16). Se demuestra que tienen unos tamaños muy similares a las del **NO_2 anual**, lo que está en concordancia con el hecho de que los histogramas de distribución de tamaños (Figuras 7 y 9) son también relativamente similares.

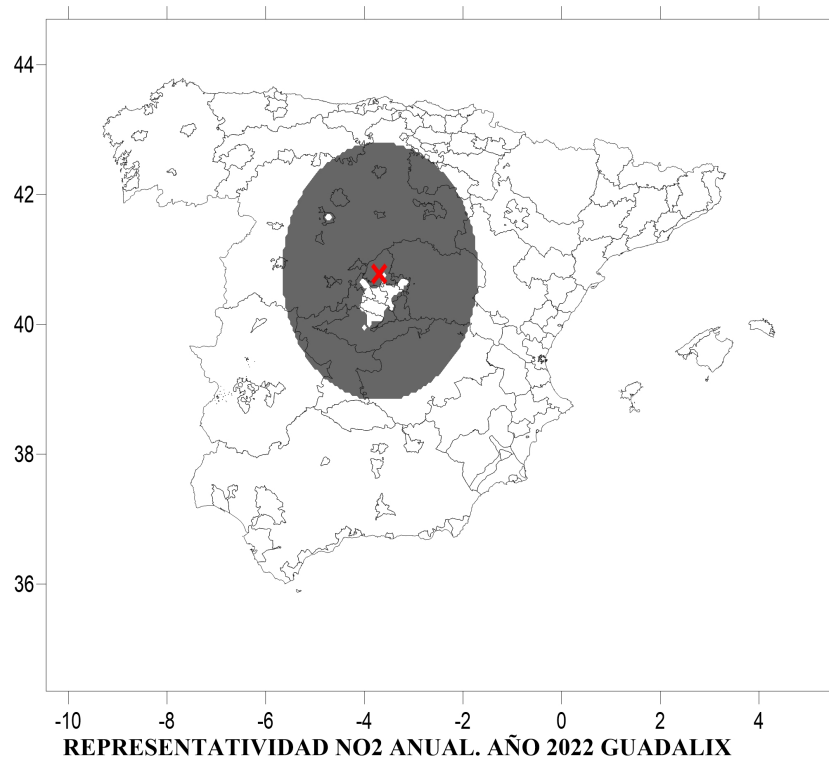


Figura 9. Área de representatividad de la estación de Guadalix para el NO₂ anual 2022

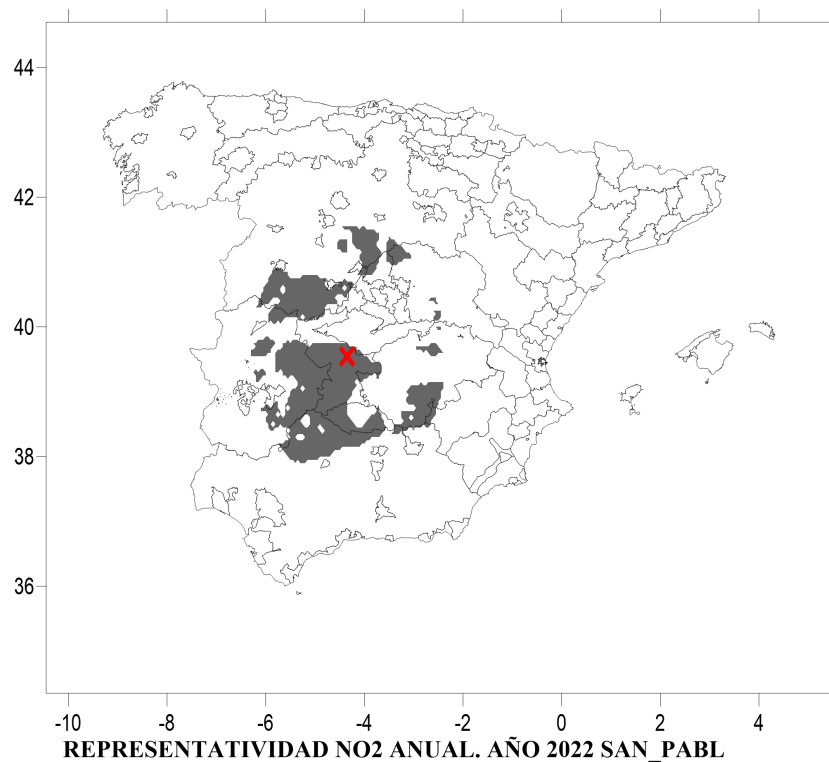


Figura 10. Área de representatividad de la estación de San Pablo para el NO₂ anual 2022

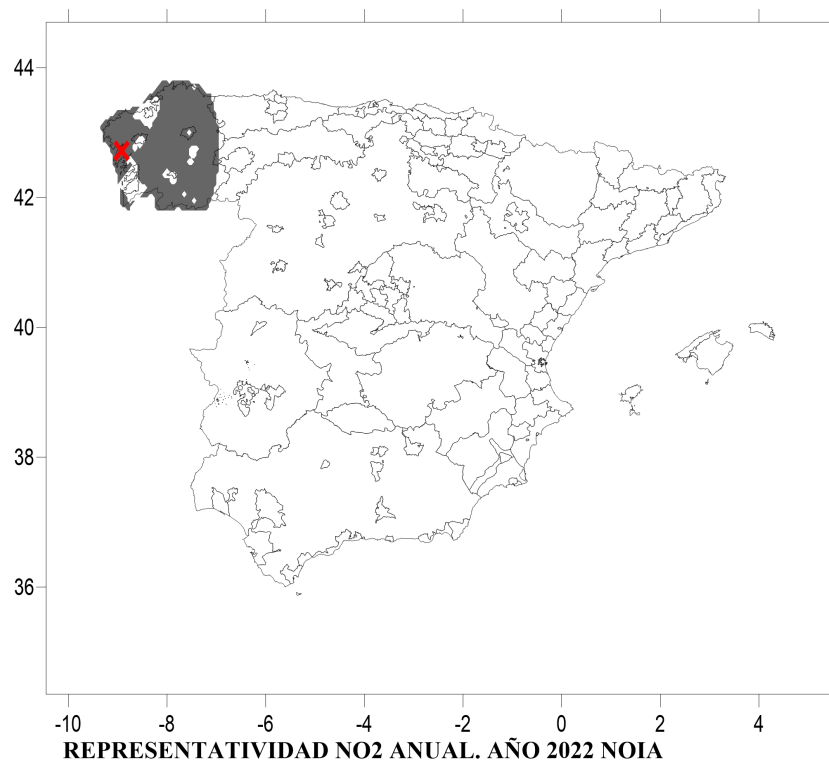


Figura 11. Área de representatividad de la estación de Noia para el NO₂ anual 2022



Figura 12. Área de representatividad de la estación de Cabo de Creus para el NO₂ anual 2022

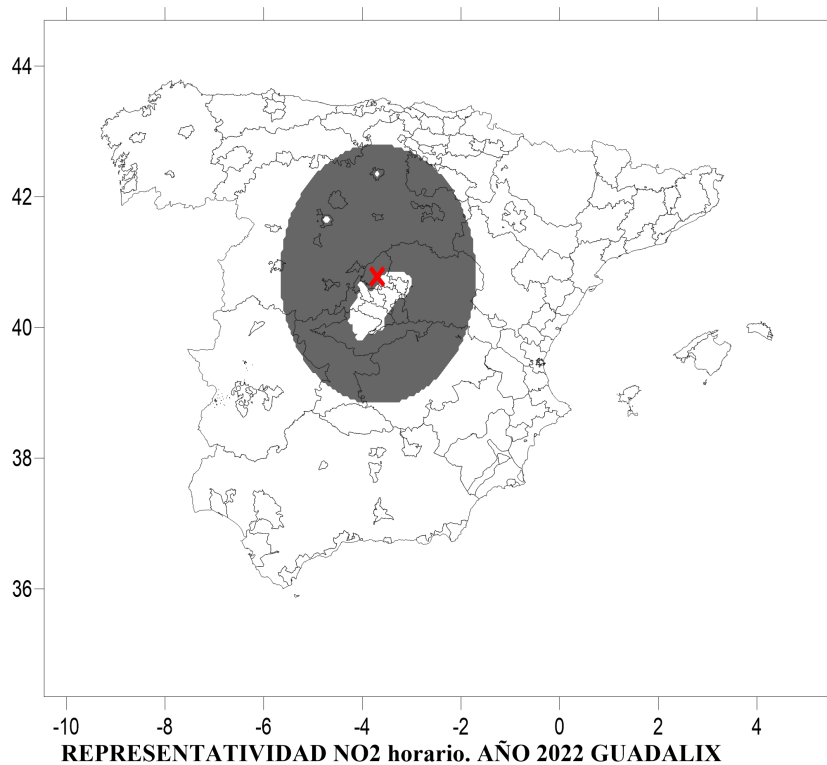


Figura 13. Área de representatividad de la estación de Guadalupe para el NO₂ horario 2022

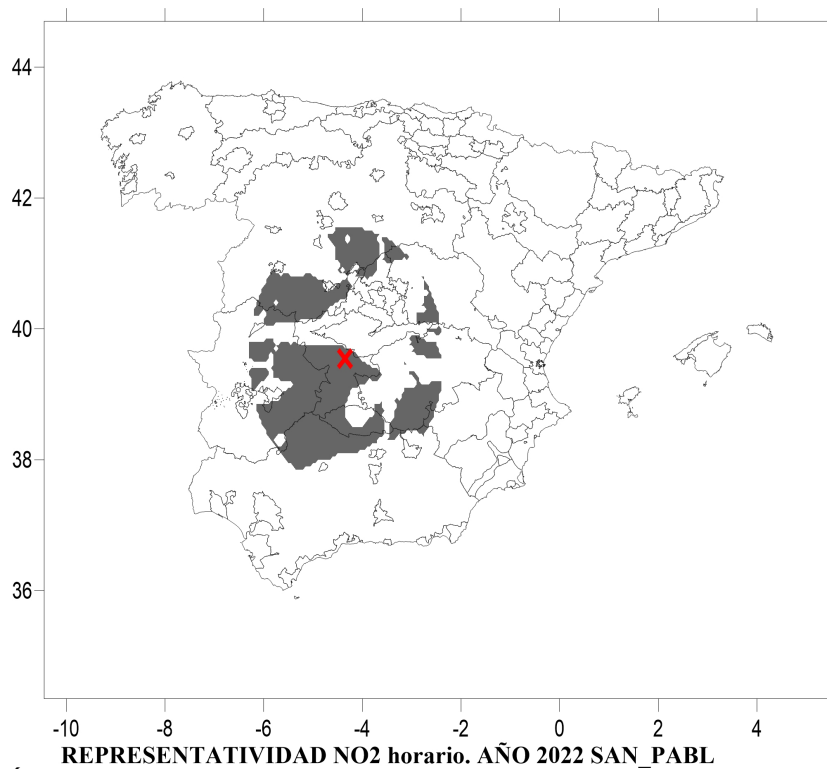


Figura 14. Área de representatividad de la estación de San Pablo para el NO₂ horario 2022

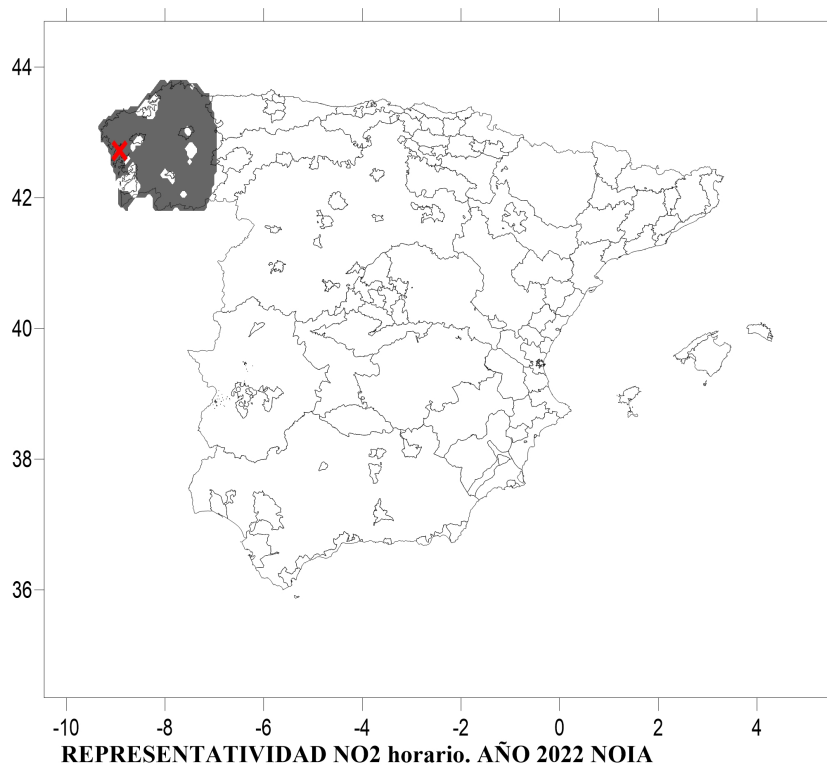


Figura 15. Área de representatividad de la estación de Noia para el NO₂ horario 2022

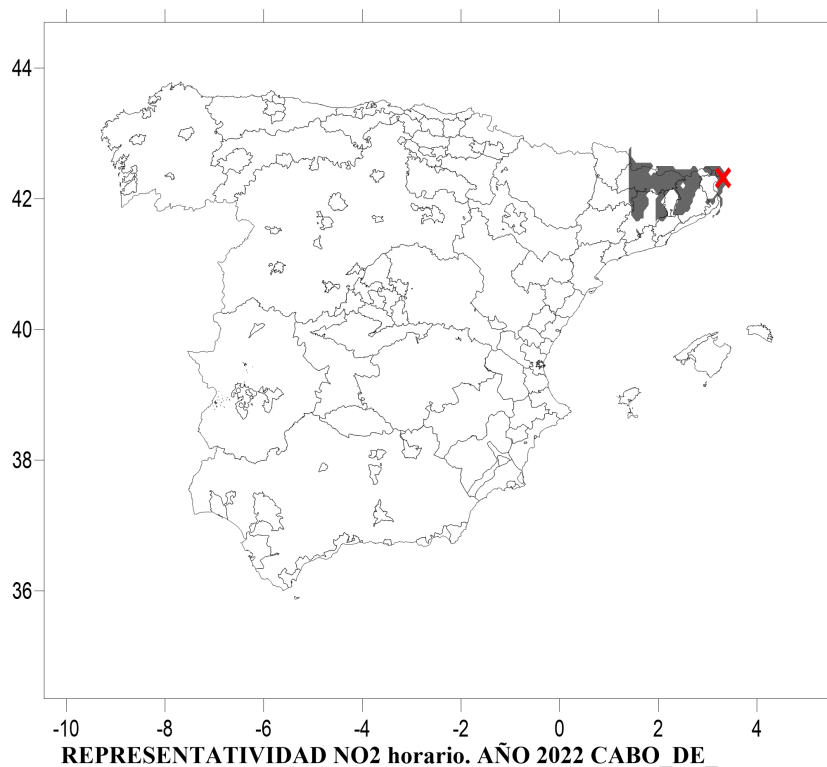


Figura 16. Área de representatividad de la estación de Cabo Creus para el NO₂ horario 2022

Respecto al **ozono horario y octohorario**, las áreas de representatividad son menos extensas que otros contaminantes como el NO₂ y el SO₂. En el caso de ozono horario la mayoría de las áreas de representatividad son de un tamaño relativo (respecto al tamaño máximo posible) al 60% con una media del 54% (Figura 17). Las áreas para el ozono octohorario son ligeramente mayores con un tamaño relativo medio del 56% (Figura 18).

Se muestran algunos ejemplos de estaciones con grandes áreas de representatividad (Figuras 19, 23 y 25) y otras de tamaño relativo medio (Figuras 20, 22 y 24) o pequeño (Figuras 21 y 26) tanto para ozono horario como octohorario. Se puede ver que en algunos casos hay bastante semejanza entre las áreas para ozono horario y para el octohorario como en el caso de San Martín (aunque más pequeña en el octohorario, Figuras 19 y 23) pero no en los otros casos aquí mostrados.

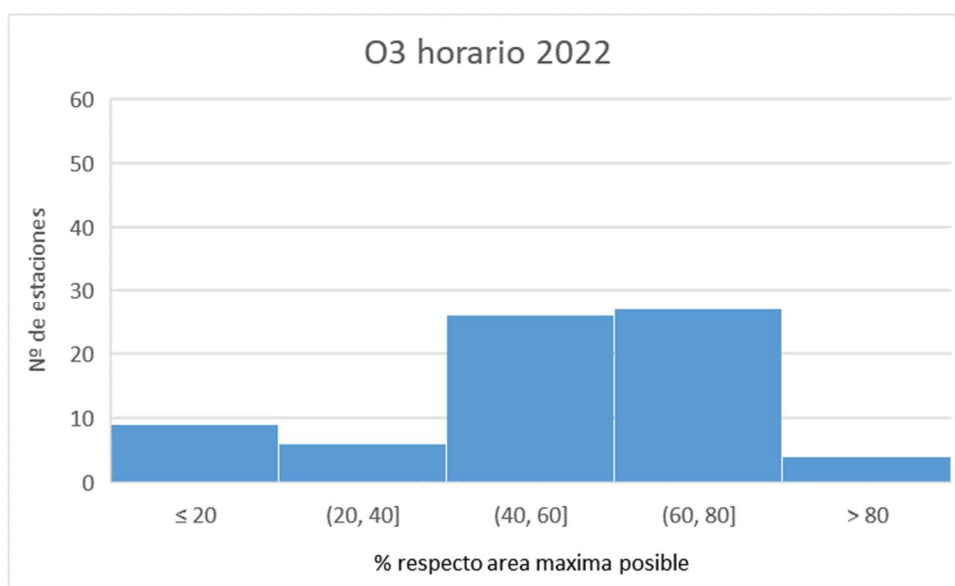


Figura 17. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el O₃ horario

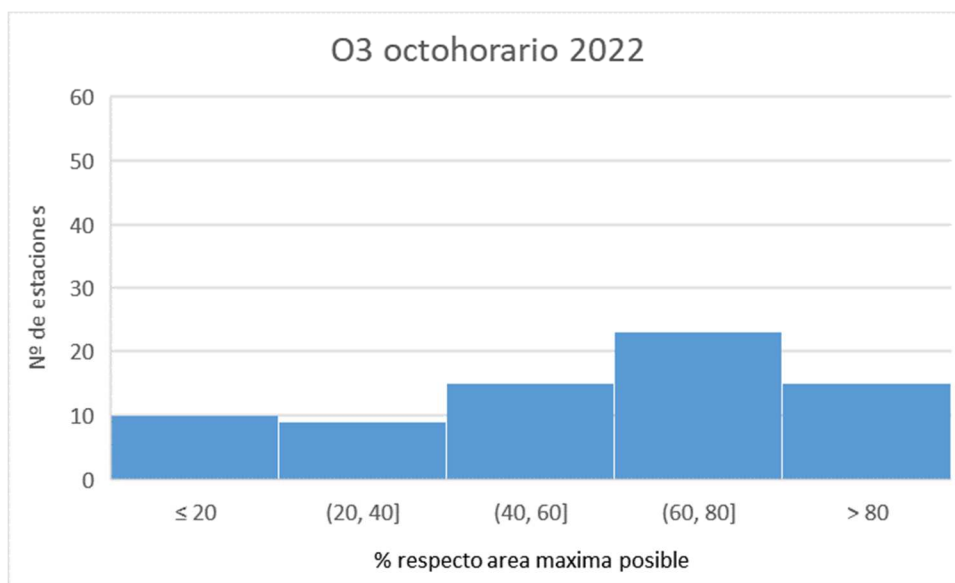


Figura 18. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el O₃ octohorario

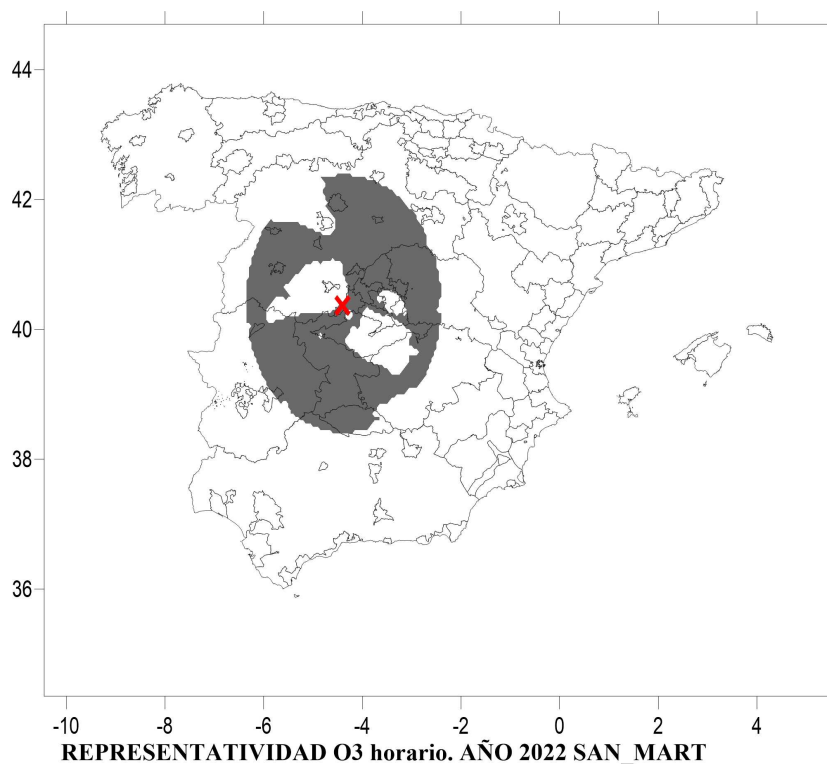


Figura 19. Área de representatividad de la estación de San Martín para el ozono horario 2022

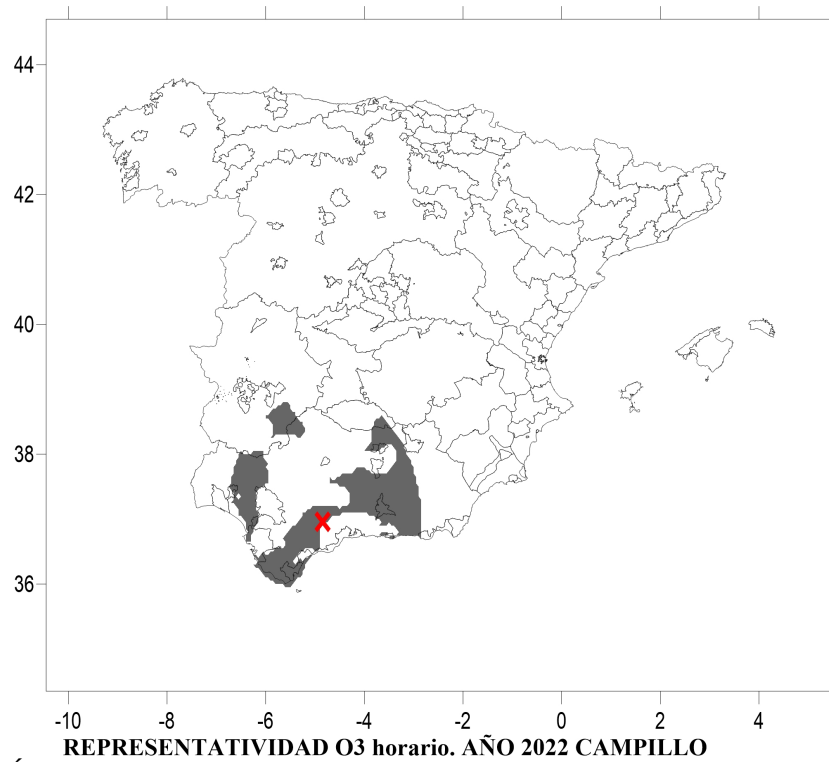


Figura 20. Área de representatividad de la estación de Campillo para el ozono horario 2022



Figura 21. Área de representatividad de la estación de Noia para el ozono horario 2022

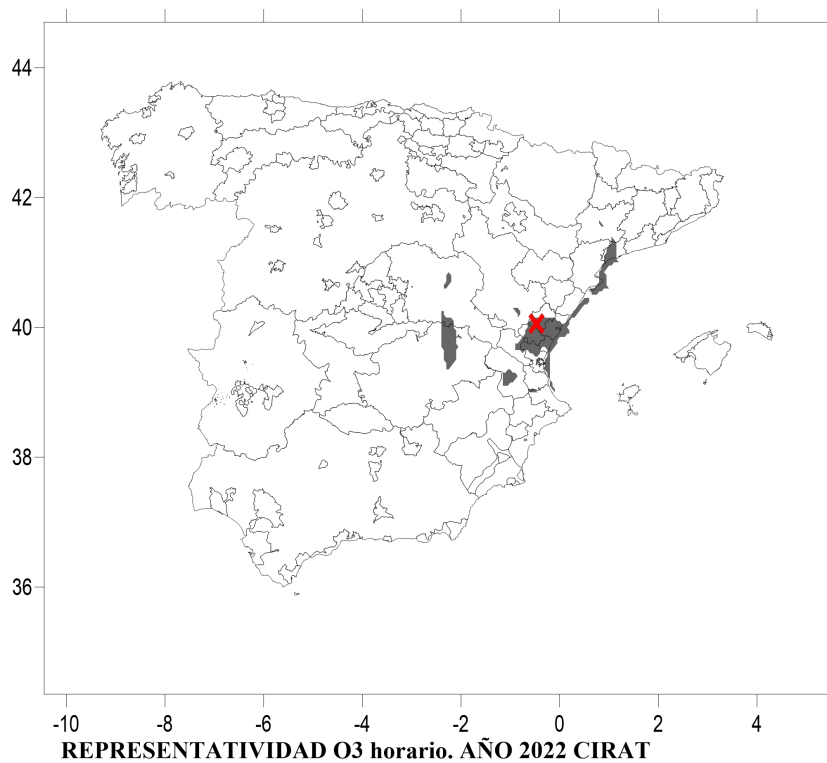


Figura 22. Área de representatividad de la estación de Cirat para el ozono horario 2022



Figura 23. Área de representatividad de la estación de San Martín para el ozono octohorario 2022

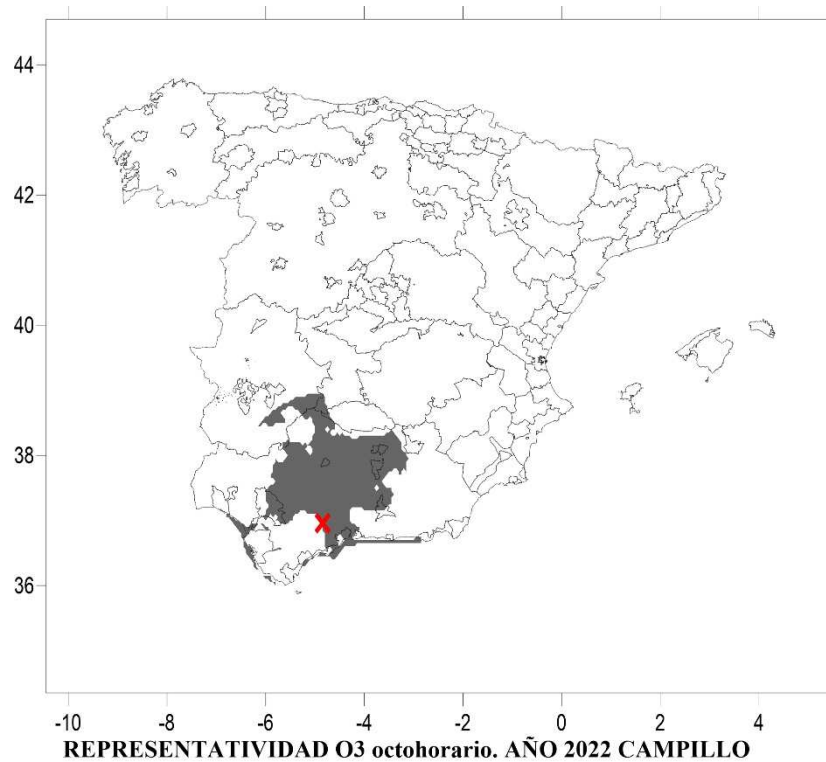


Figura 24. Área de representatividad de la estación de Campillo para el ozono octohorario 2022



Figura 25. Área de representatividad de la estación de Noia para el ozono octohorario 2022



Figura 26. Área de representatividad de la estación de Cirat para el ozono octohorario 2022

También en el caso del **PM2.5 anual**, las áreas de representatividad son relativamente más extensas que para el ozono con un tamaño relativo medio del 62% (Figura 27), pero claramente más pequeñas que en los casos del NO₂ y el SO₂.

En las figuras 28 a 31, se muestran ejemplos de áreas de representatividad relativo, desde el caso de Hospital que tiene un tamaño relativo al máximo posible del 82% o Barcarrota con un 71% a Niembro con un 31%. No siempre son compactas. En algunos casos, son bastante dispersas (figuras 26). Parte de esa fragmentación se debe a proximidad a zonas urbanas.

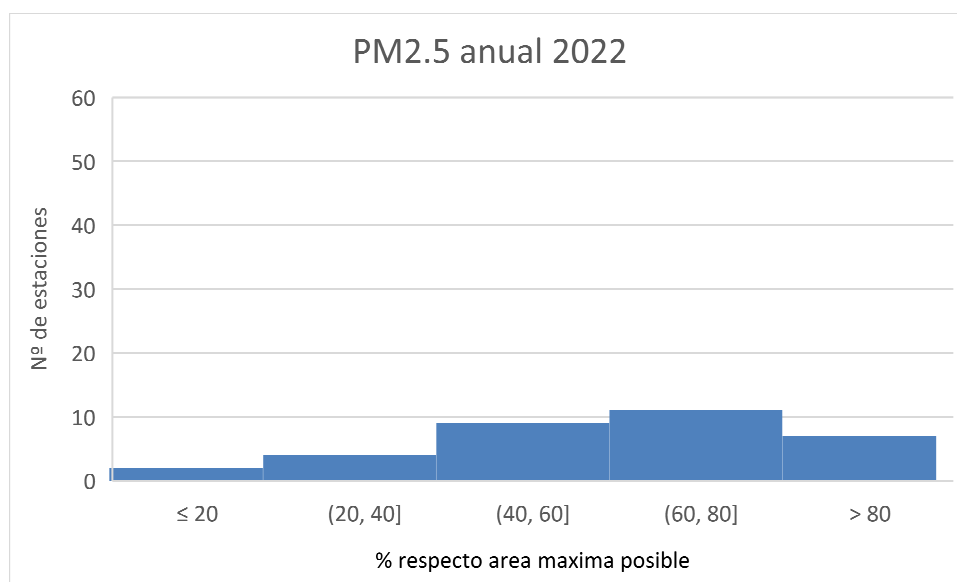


Figura 27. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el PM2.5 anual



Figura 28. Área de representatividad de la estación de Barcarrota para el PM2.5 anual 2022.

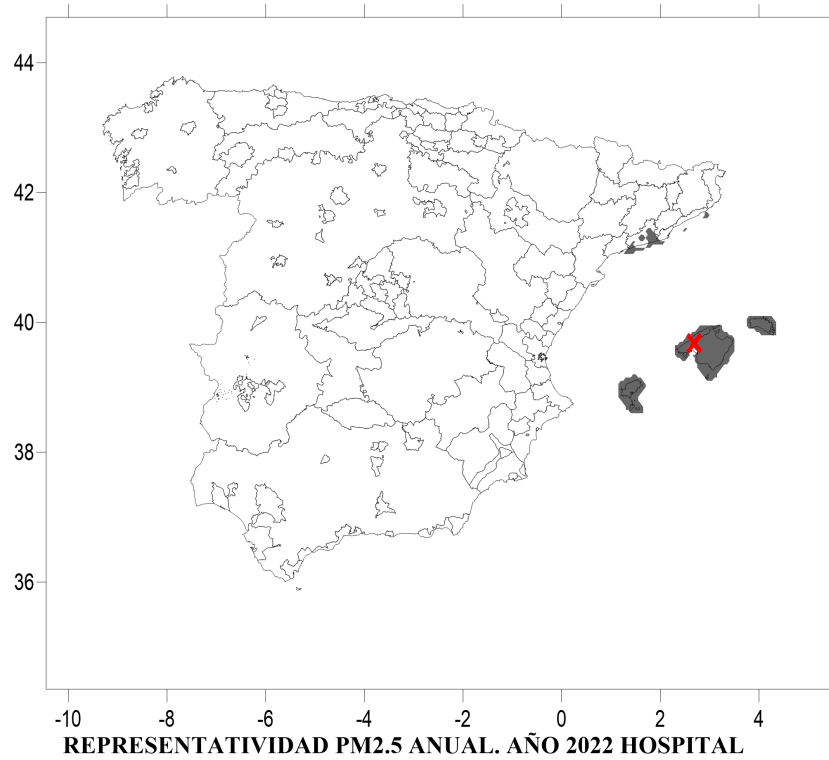


Figura 29. Área de representatividad de la estación de Hospital para el PM2.5 anual 2022

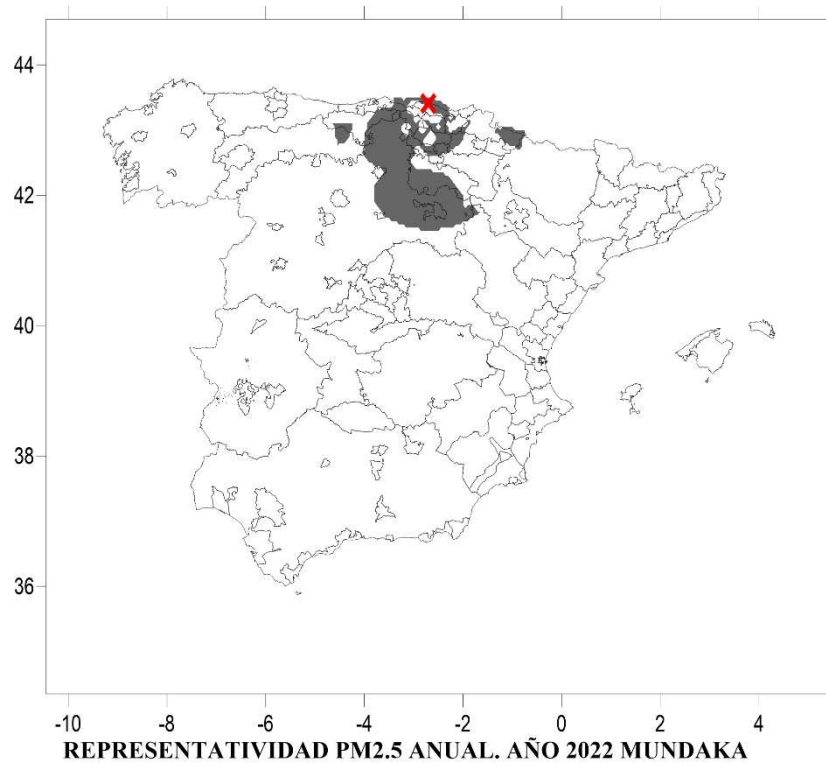


Figura 30. Área de representatividad de la estación de Mundaka para el PM2.5 anual 2022

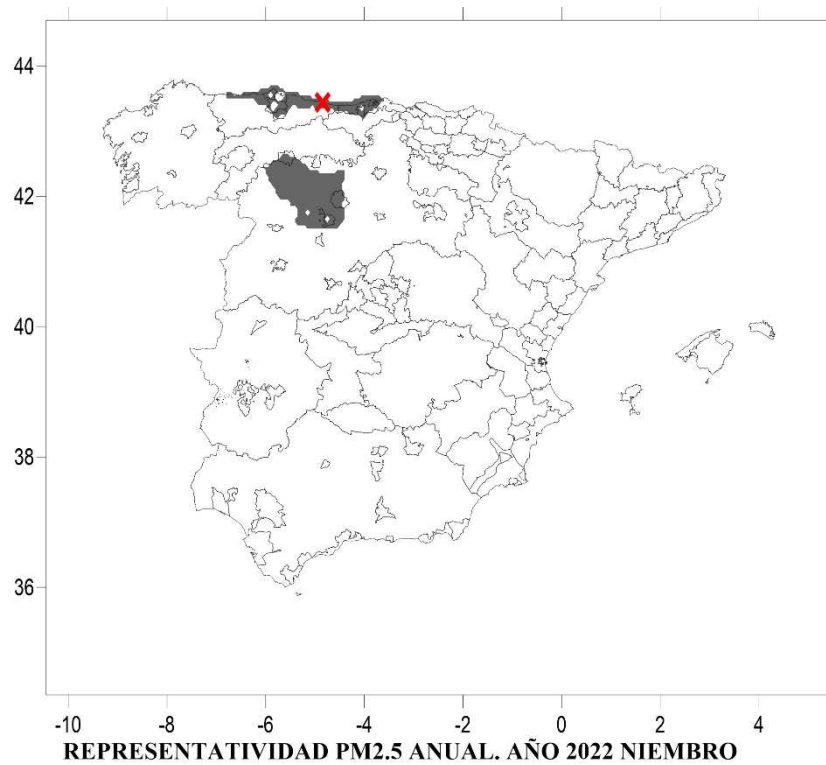


Figura 31. Área de representatividad de la estación de Niembro para el PM2.5 anual 2022

En cuanto al **PM10**, las áreas de representatividad son de tamaños similares a las encontradas para el ozono o el PM2.5. Para **PM10 anual**, el tamaño relativo medio es del 61 % y más pequeño para el **PM10 diario** (con 53% de tamaño relativo medio) (Figuras 32 y 33).

Al igual que para los otros contaminantes, se muestran ejemplos de áreas de representatividad para distintas estaciones mostrando diversos tamaños relativos respecto de su máximo posible para cada PM10 anual y diario (Figuras 34 a 41). Comparando esas áreas de cada estación para PM10 anual y diario, se puede ver que es bastante frecuente que las áreas para el PM10 diario sean más pequeñas que las del PM10 anual, algo que ya se vio en otros años (Martín et al, 2022).

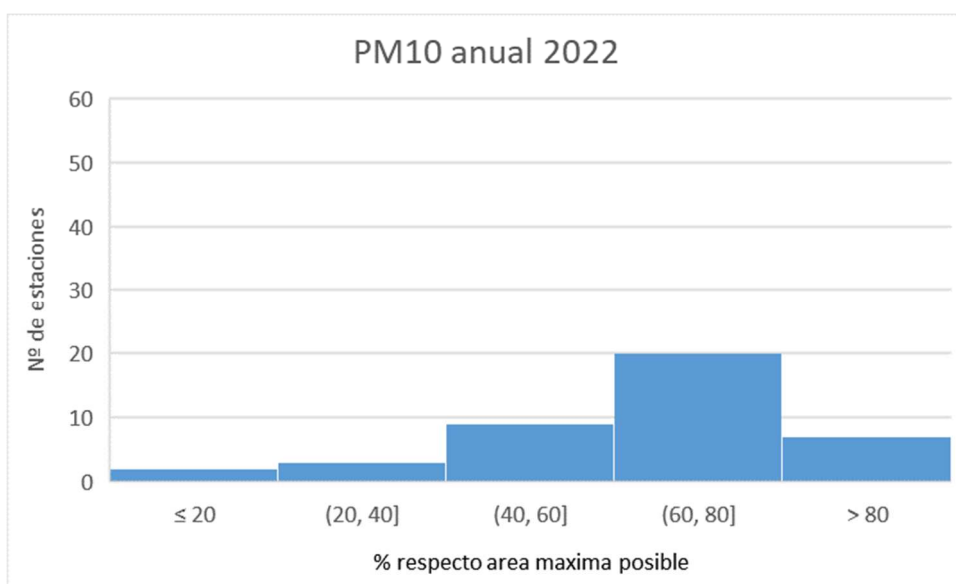


Figura 32. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el PM10 anual

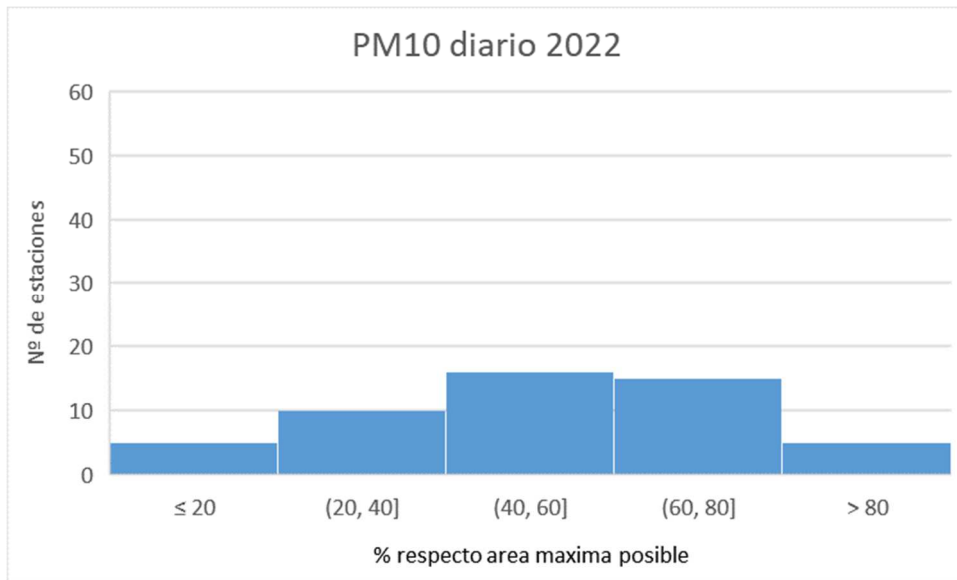


Figura 33. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el PM10 diario

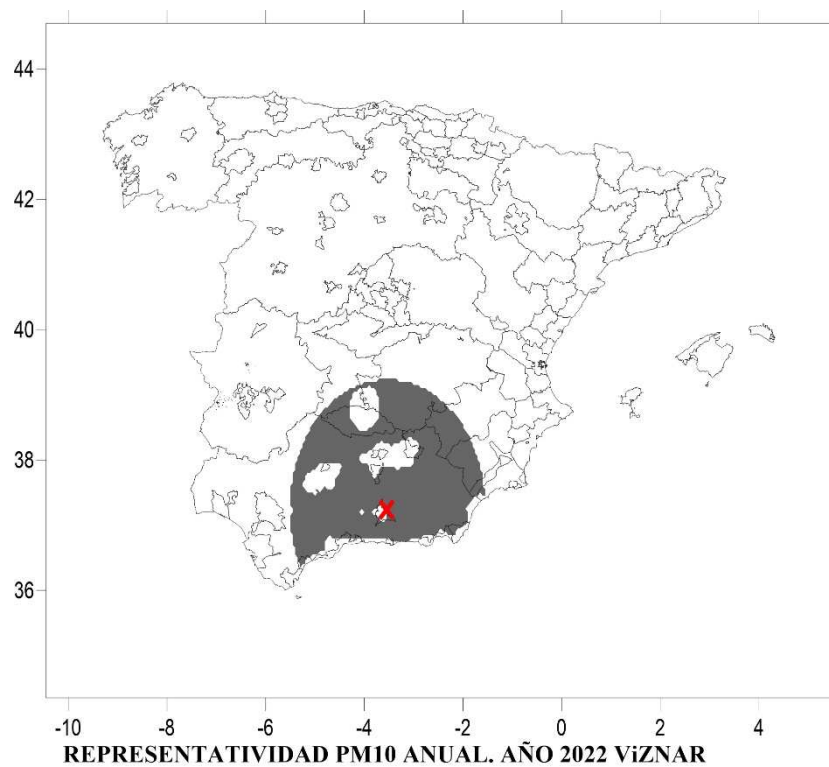


Figura 34. Área de representatividad de la estación de Viznar para el PM10 anual 2022

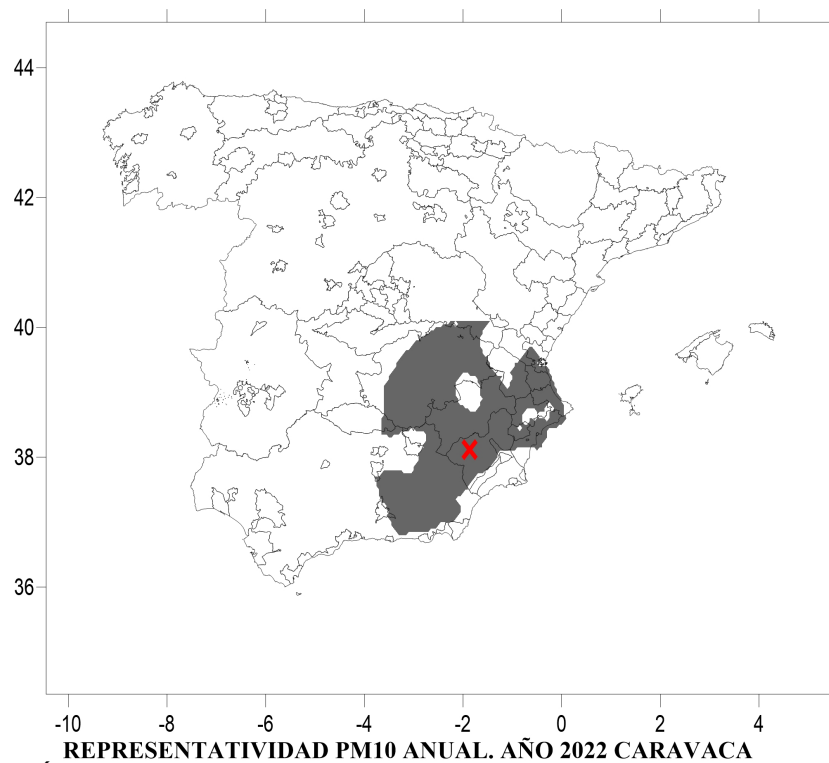


Figura 35. Área de representatividad de la estación de Caravaca PM10 anual 2022

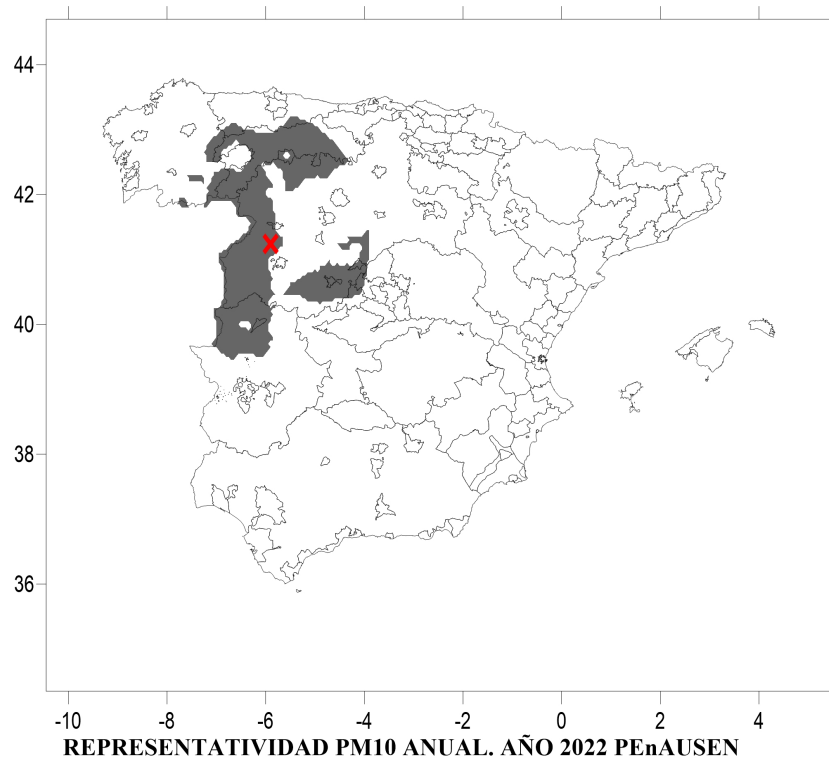


Figura 36. Área de representatividad de la estación de Peñausende PM10 anual 2022

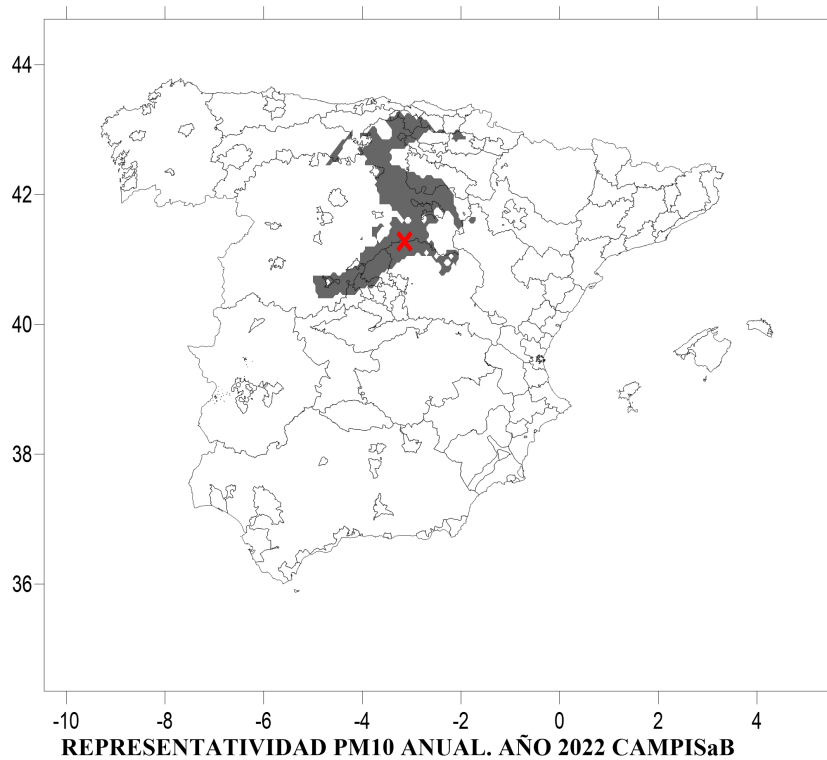


Figura 37. Área de representatividad de la estación de Campisábalos PM10 anual 2022

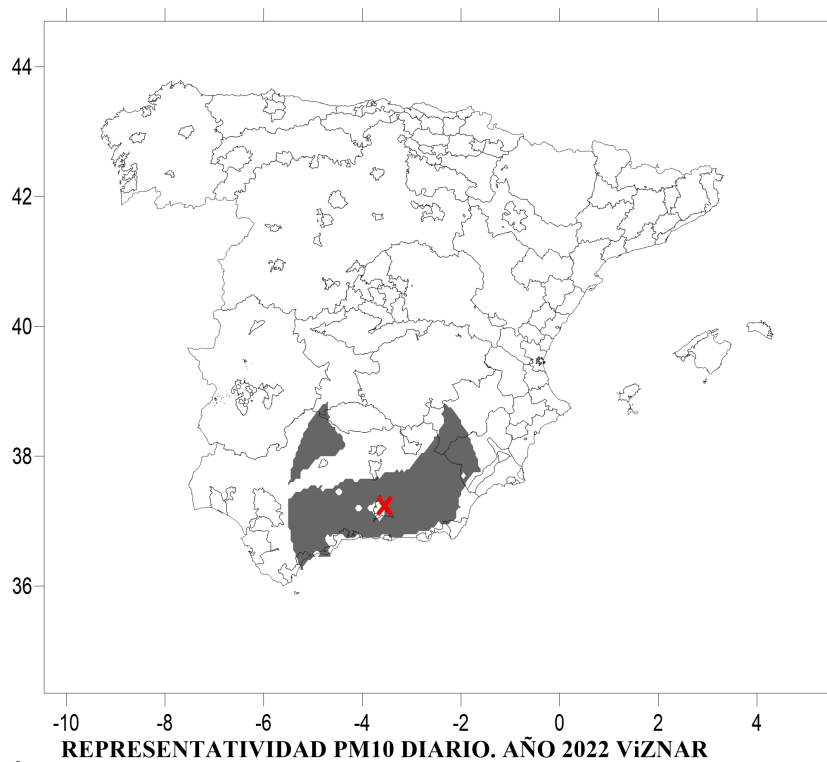


Figura 38. Área de representatividad de la estación de Viznar para el PM10 diario 2022

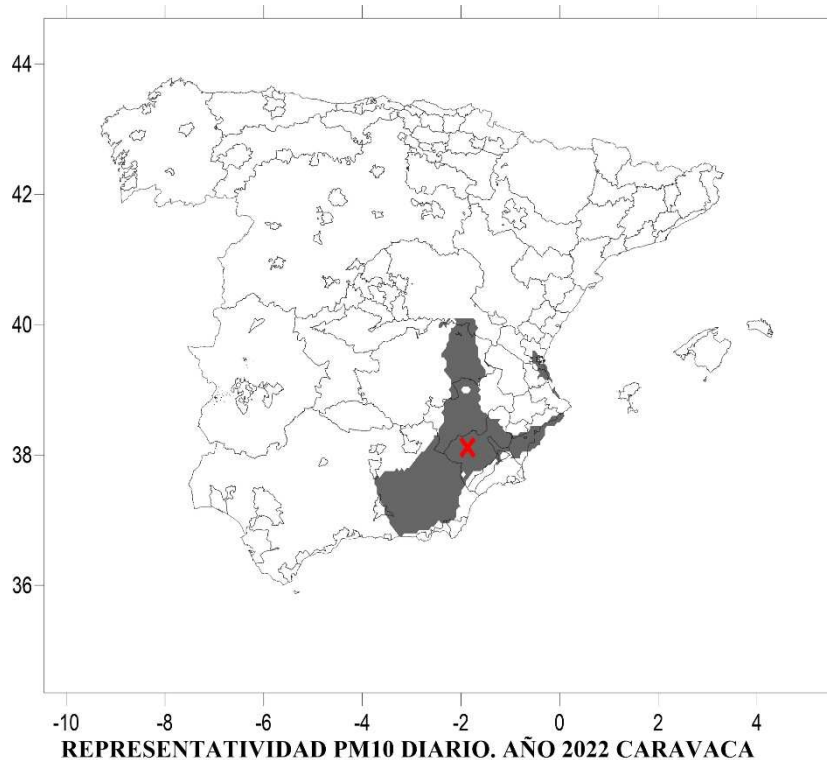


Figura 39. Área de representatividad de la estación de Caravaca PM10 diario 2022

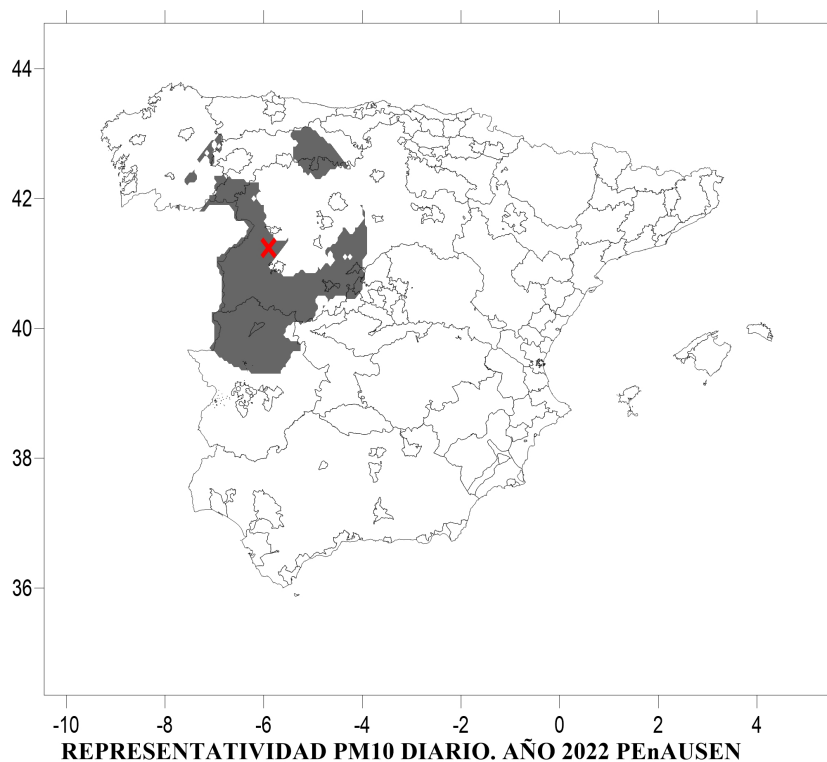


Figura 40. Área de representatividad de la estación de Peñausende PM10 diario 2022



Figura 41. Área de representatividad de la estación de Campisábalos PM10 diario 2022

Las áreas de representatividad espacial para el **SO₂** son las más extensas en todos los indicadores con tamaños medios relativos del 85%, 86% y 82% para los indicadores **anual, diario y horario**, respectivamente. Hay muy pocos casos con tamaños relativos inferiores al 60% y estando la mayoría por encima del 80% (Figuras 42-44).

Ejemplos de áreas de representatividad para 4 estaciones y para **SO₂ anual, diario y horario** se muestran en las Figuras 45-56.

En muchos casos, no hay casi variación en la extensión y forma del área de representatividad para **SO₂ anual, diario y horario** como por ejemplo es el caso de Caudete (Figuras 45, 49 y 53) y Matalascañas (47, 51 y 55). Sin embargo, se observa que en bastantes casos el área de representatividad espacial para SO₂ es diferente para cada indicador (anual, diario y horario) como es el caso de las otras dos estaciones Torrelisa (Figuras 46, 50 y 54) y Los Tojos (Figuras 48, 52 y 56). La presencia de zonas urbanas o de centrales térmicas deforman o alteran las áreas de representatividad espacial.

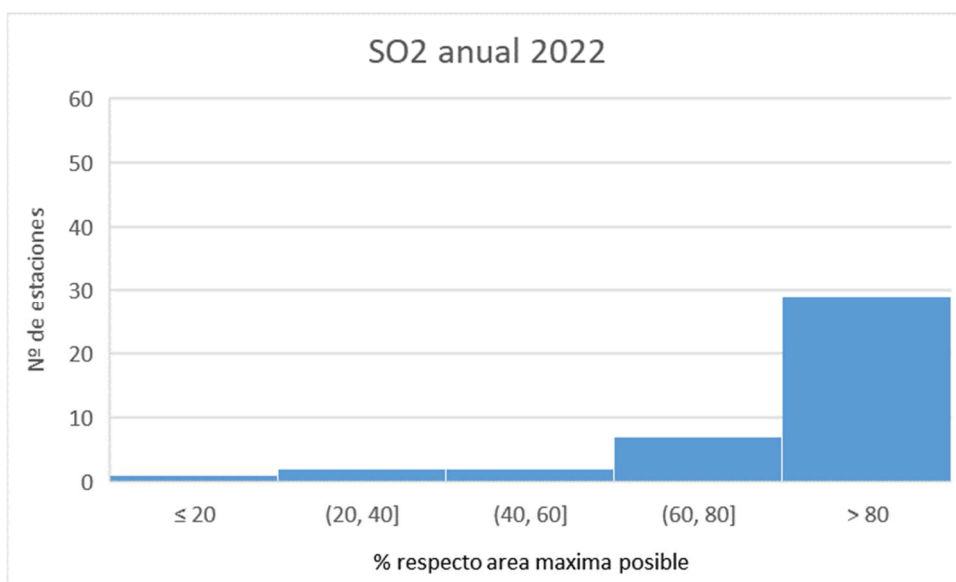


Figura 42. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el SO₂ anual

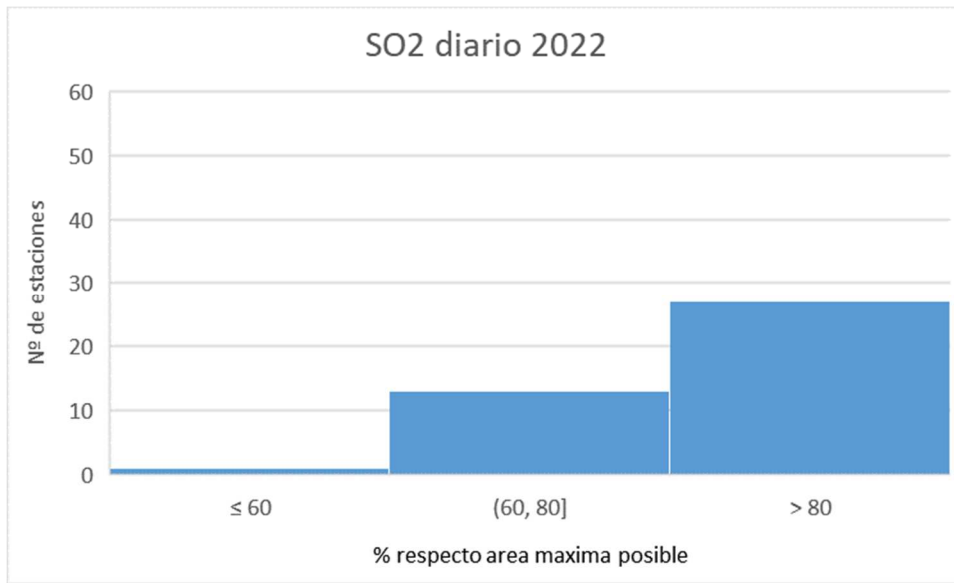


Figura 43. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el SO₂ diario

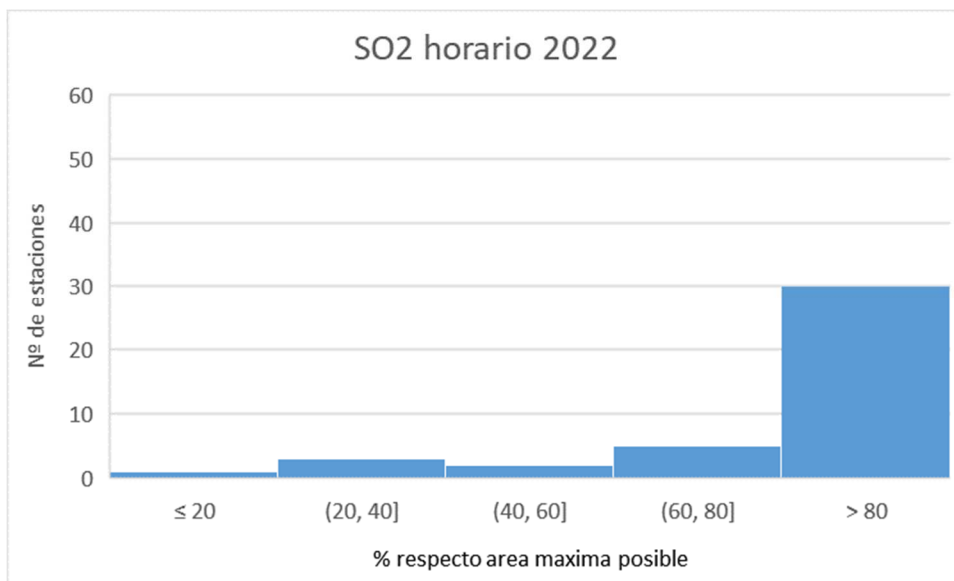


Figura 44. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad para el SO₂ horario

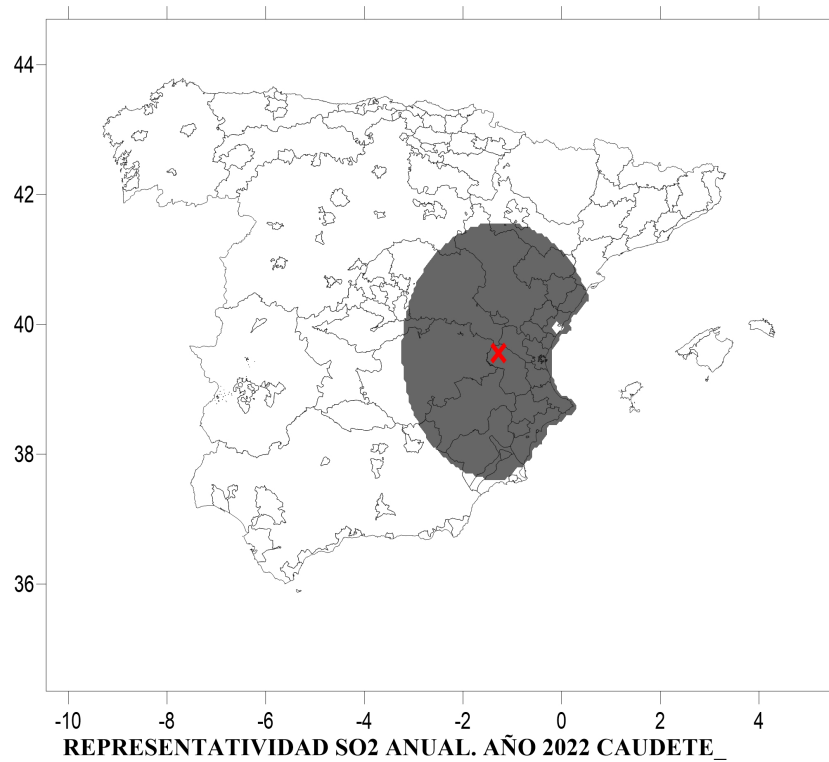


Figura 45. Área de representatividad de la estación de Caudete para el SO₂ anual 2022

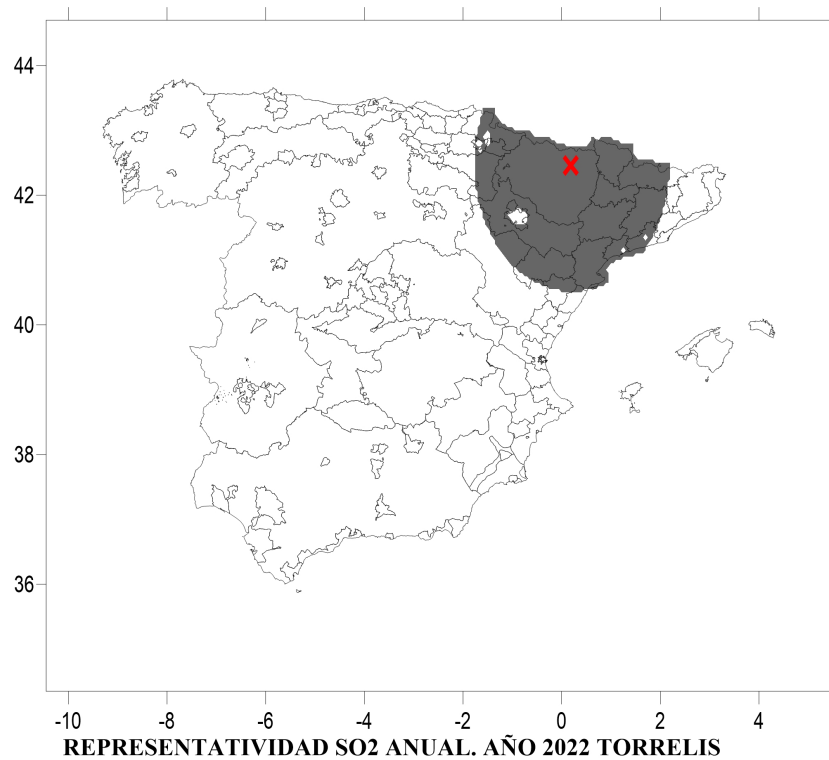


Figura 46. Área de representatividad de la estación de Torrelisa para el SO₂ anual 2022



Figura 47. Área de representatividad de la estación de Matalascañas para el SO₂ anual 2022

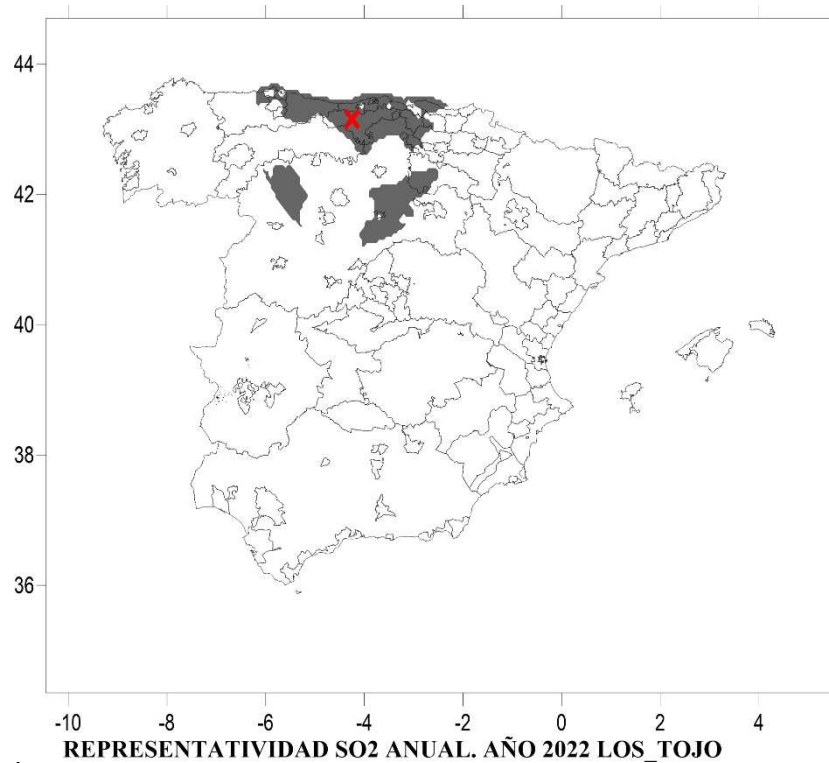


Figura 48. Área de representatividad de la estación de Los Tojos para el SO₂ anual 2022

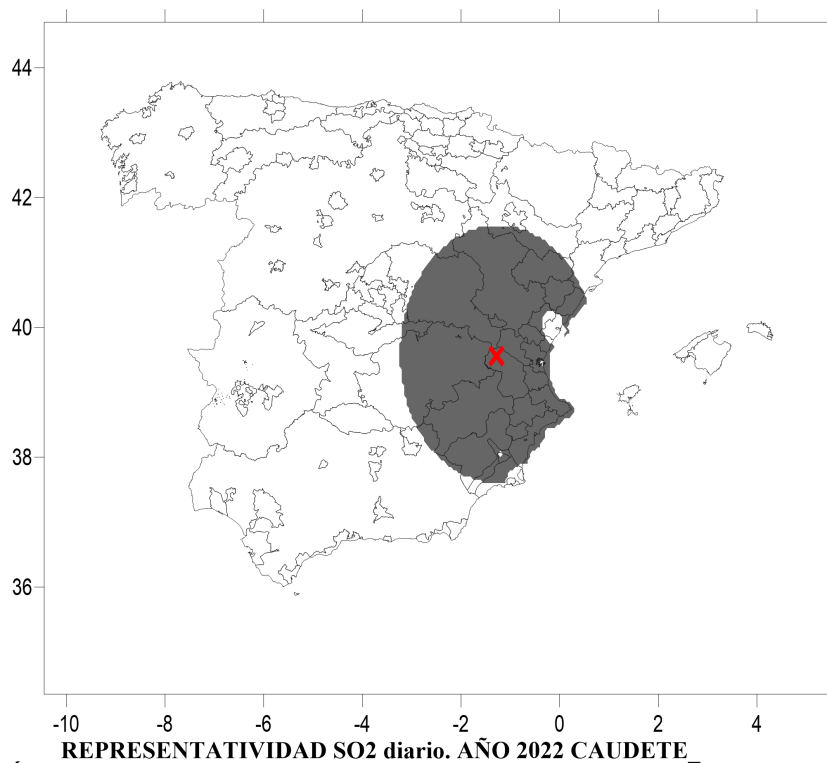


Figura 49. Área de representatividad de la estación de Caudete para el SO_2 diario 2022



Figura 50. Área de representatividad de la estación de Torrelisa para el SO_2 diario 2022

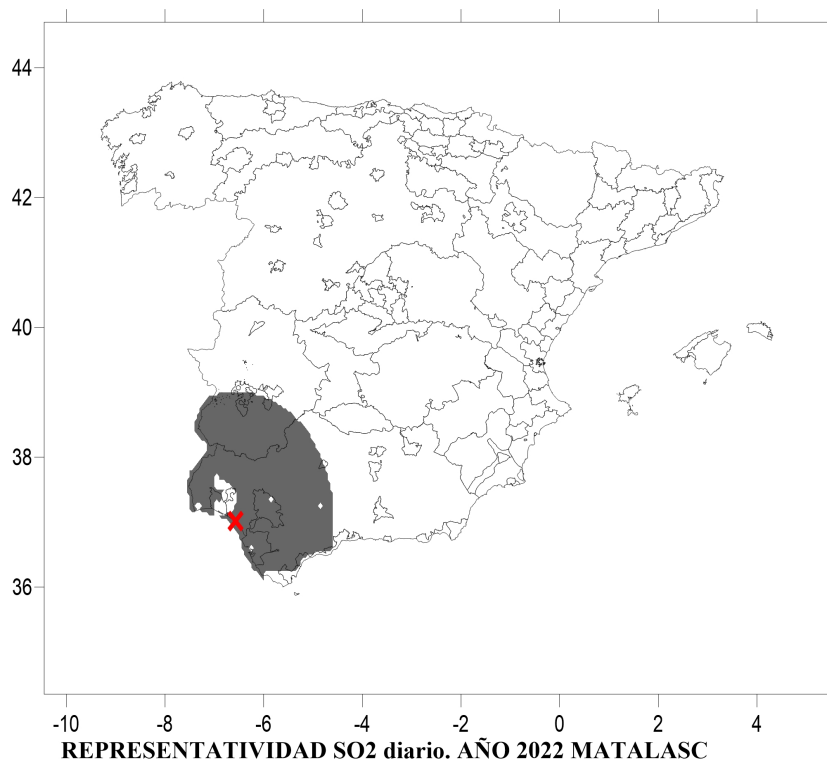


Figura 51. Área de representatividad de la estación de Matalascañas para el SO₂ diario 2022

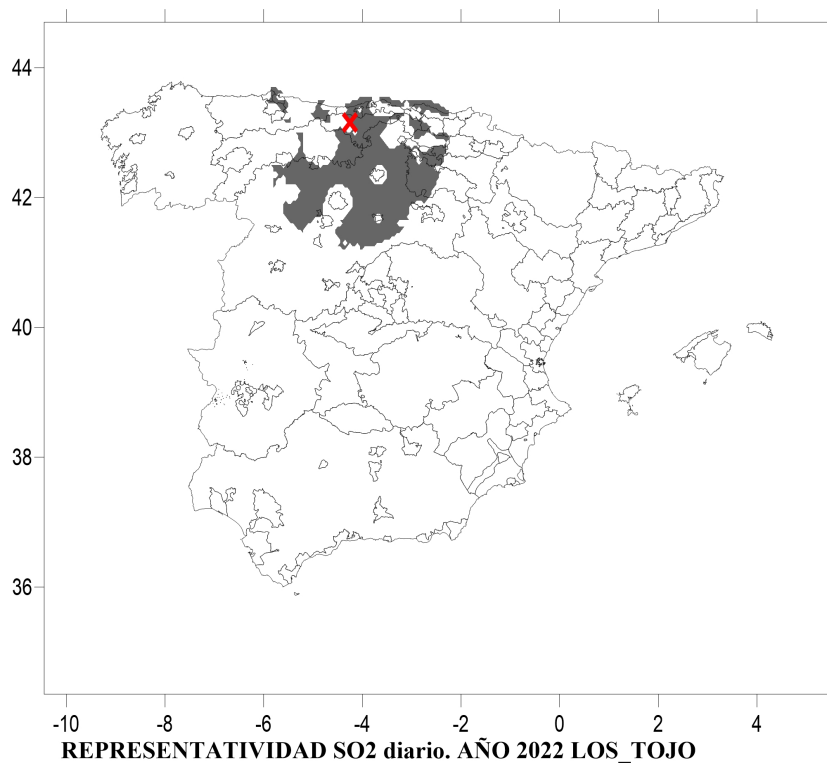


Figura 52. Área de representatividad de la estación de Los Tojos SO₂ diario 2022

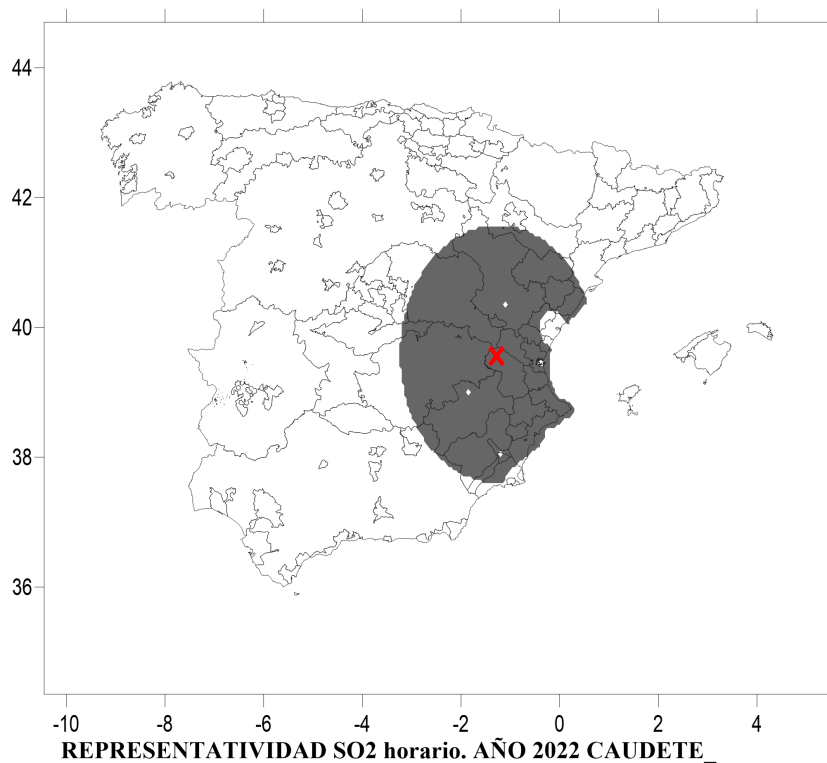


Figura 53. Área de representatividad de la estación de Caudete SO₂ horario 2022

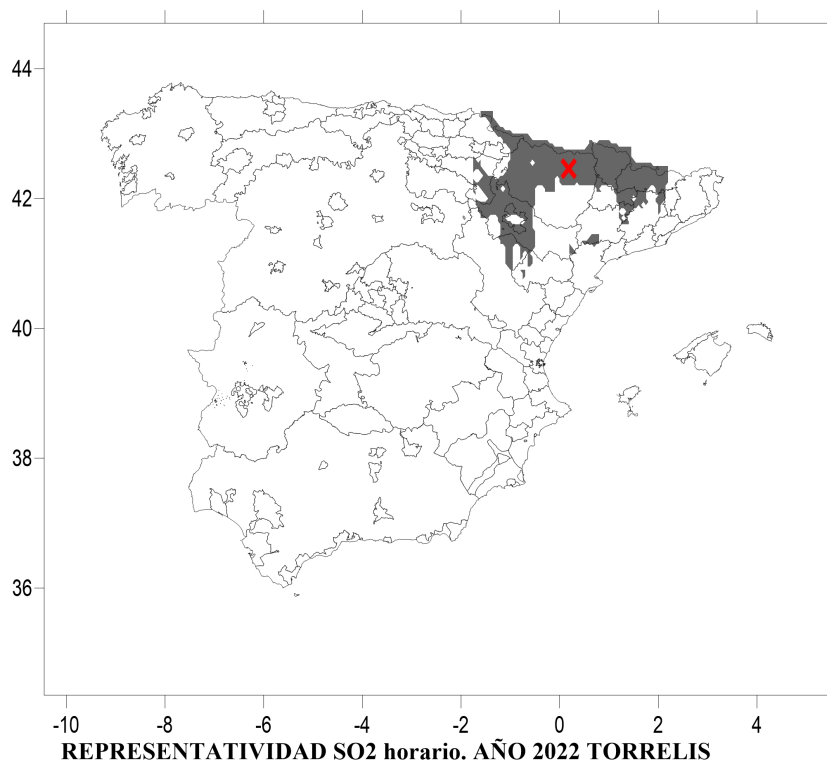


Figura 54. Área de representatividad de la estación de Torrelisa para el SO₂ horario 2022

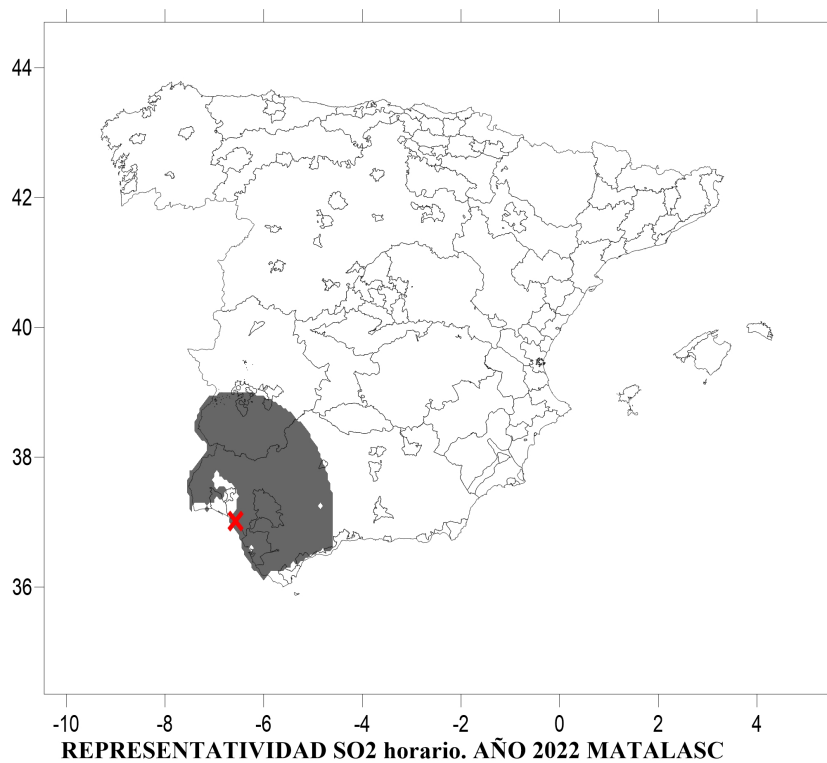


Figura 55. Área de representatividad de la estación de Matalascañas para el SO₂ horario 2022

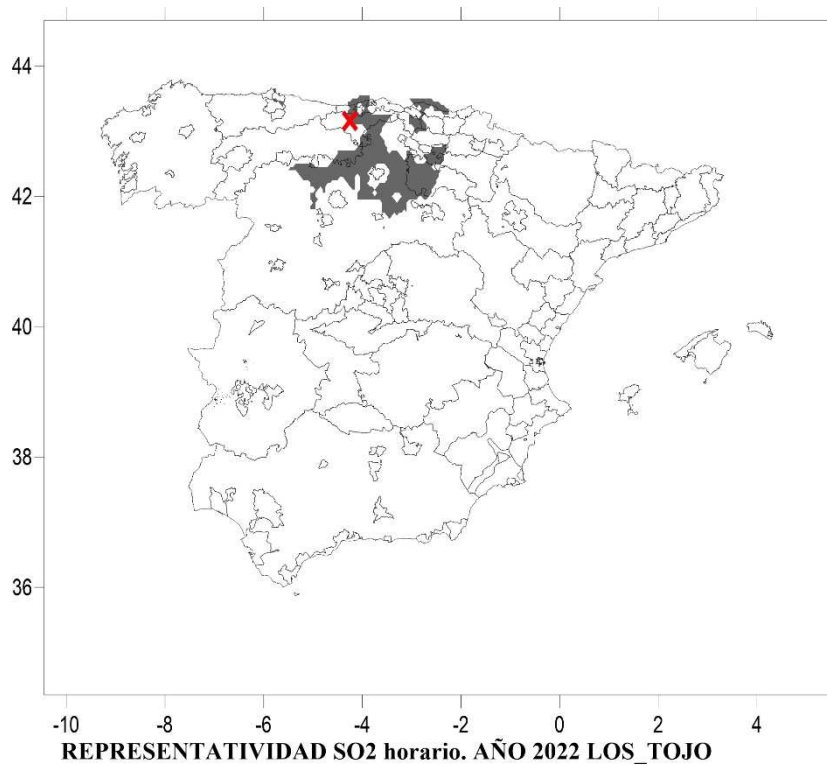


Figura 56. Área de representatividad de la estación de Los Tojos para el SO₂ horario 2022

Los mapas de representatividad espacial de todas las estaciones con datos para cada contaminante e indicador (o tiempo de promedio) están en formato digital y son entregados al MITERD junto con este informe.

Del análisis de todos los mapas, se llegan a unas conclusiones bastante similares a las obtenidas en los informes de representatividad espacial de 2019 y 2020 (Martín et al, 2021) y 2021 (Martín et al, 2022). Las áreas de representatividad espacial de las estaciones rurales de fondo cambian de un contaminante a otro, de un tiempo de promedio a otro. Si bien, en muchos casos estas diferencias puede que no sean muy grandes, en otros muchos esas diferencias son muy significativas. Las diferencias entre contaminantes pueden estar muy ligadas a la distribución espacial de las fuentes de los distintos contaminantes principalmente y en alguna medida, a los procesos que sufren esos contaminantes (el caso del ozono como contaminante secundario es el más claro). Las áreas de representatividad para el SO₂ son las más grandes, en general, seguidas de cerca por las del NO₂. Los demás contaminantes presentan áreas de representatividad más pequeñas en media en la mayoría de las estaciones. Los indicadores horarios para NO₂ y SO₂ suelen tener asociadas áreas de representatividad más pequeñas respecto a los anuales. También los diarios en el caso del PM₁₀. Para el ozono, las áreas asociadas al ozono horario son algo más pequeñas que las del ozono octohorario.

En secciones posteriores, se analizará el grado de persistencia interanual de las áreas de representatividad de cada estación y contaminante.

6. RESULTADOS DE COBERTURA ESPACIAL DEL CONJUNTO DE ESTACIONES EN 2022

La representatividad o cobertura espacial de las redes de medida para cada contaminante se ha calculado sumando las representatividades espaciales de todas las estaciones. A continuación (Figuras 57-61), se muestran las coberturas espaciales del conjunto de estaciones rurales de fondo de la España Peninsular y Baleares para cada contaminante y tiempo de promedio (anual, diario, horario y octohorario) para 2022.

La representatividad espacial del conjunto de estaciones rurales de fondo que miden **NO₂** en 2022 abarca la práctica totalidad del territorio dejando sin cubrir principalmente grandes zonas urbanas principalmente y alguna industrial. La cobertura es algo menor para los valores horarios (figura 57).

La cobertura espacial de las estaciones rurales de fondo que miden **O₃** en 2022 también cubre la gran mayoría del territorio, aunque con algunas zonas rurales fuera de cobertura. En el caso de los valores horarios hay 3 zonas fuera de cobertura en el centro de la Península y 2 en Sur. Respecto de la cobertura para ozono octohorario, hay más zonas extensas sin cobertura en Andalucía, Castilla La Mancha, Castilla León, Cantabria, Asturias y Galicia. Aparte hay otras más pequeñas que se corresponden a zonas urbanas.

Para el **PM_{2.5}** en 2022, el número de estaciones disponible es significativamente menor que para otros (33, frente a los 72 de ozono, 57 de NO₂, 51 de PM₁₀ o 41 de SO₂). No obstante, estas estaciones proporcionan una cobertura espacial bastante buena, aunque con algunas “calvas” en zonas urbanas e industriales, pero también en zonas rurales en varias comunidades autónomas como Andalucía, Murcia, Comunidad Valenciana, Cataluña, Aragón, Navarra, La Rioja, Cantabria y Asturias, principalmente (figura 59).

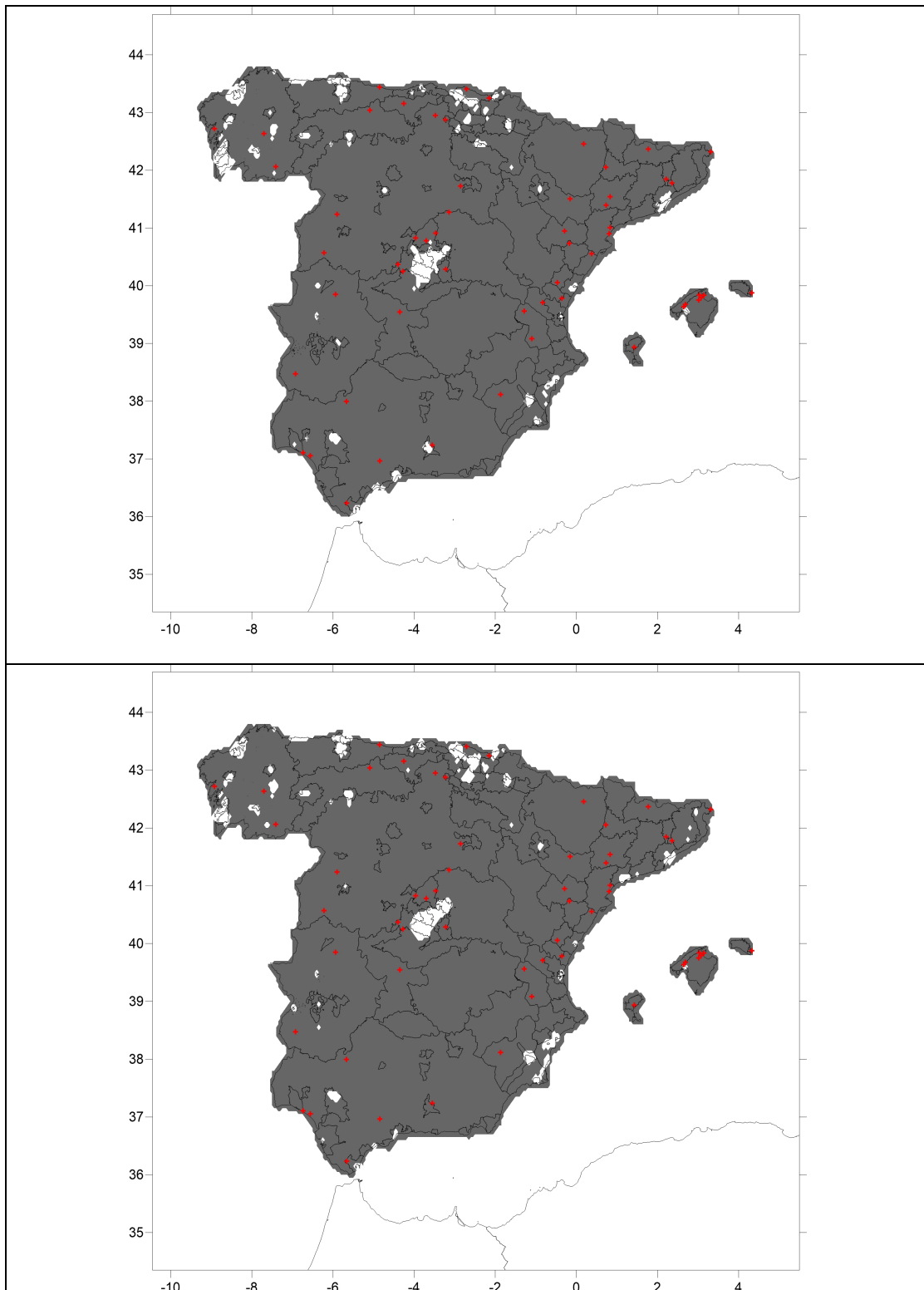


Figura 57. Cobertura espacial de estaciones rurales de fondo que registran NO₂ en 2022 para concentraciones medias anuales (arriba) y para el 19º valor mayor de concentración horaria (abajo). Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

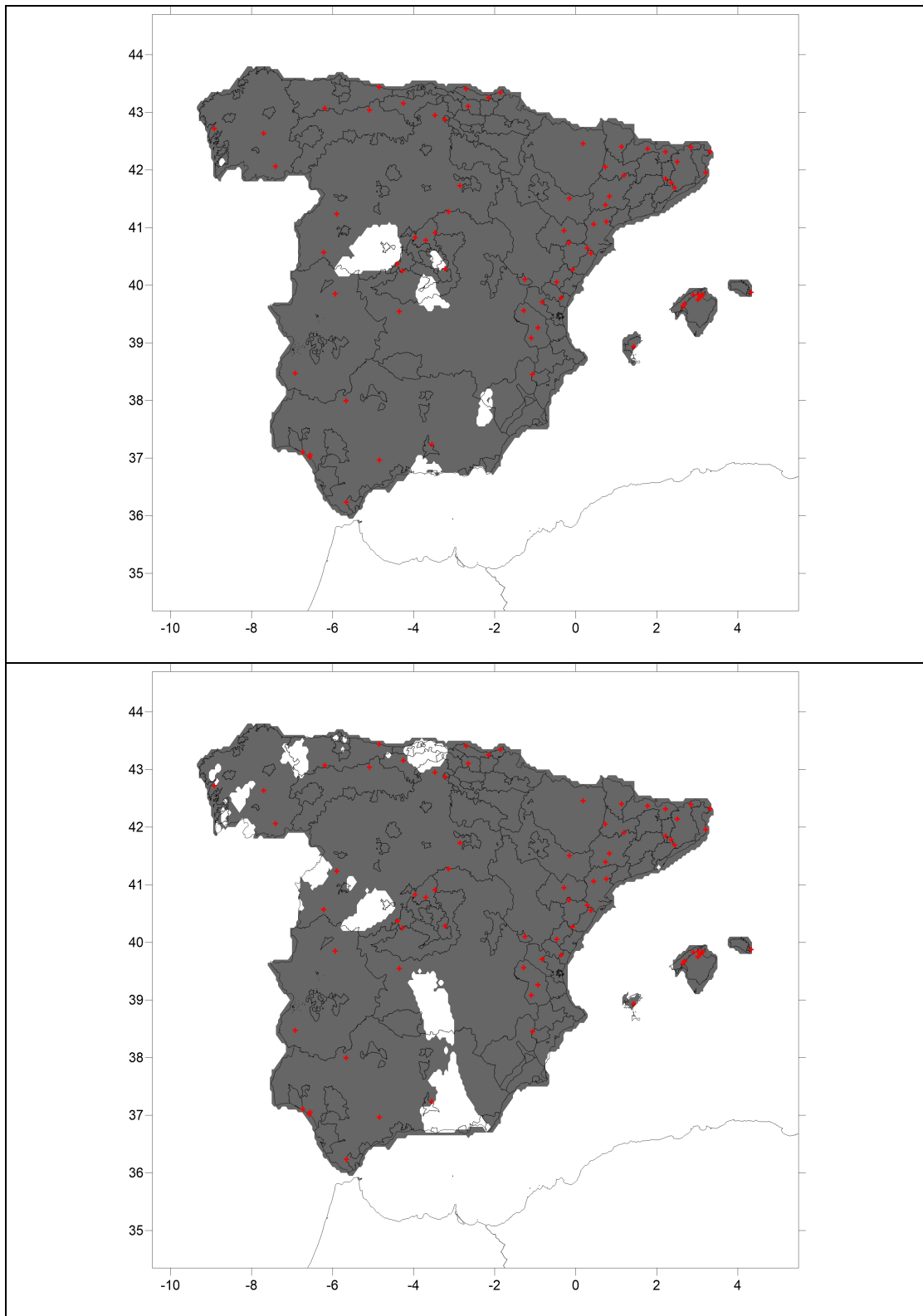


Figura 58. Cobertura espacial de estaciones rurales de fondo que registran O_3 en 2022 para concentraciones máximas horarias (arriba) y para el 26º valor mayor de concentración octohoraria (abajo). Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

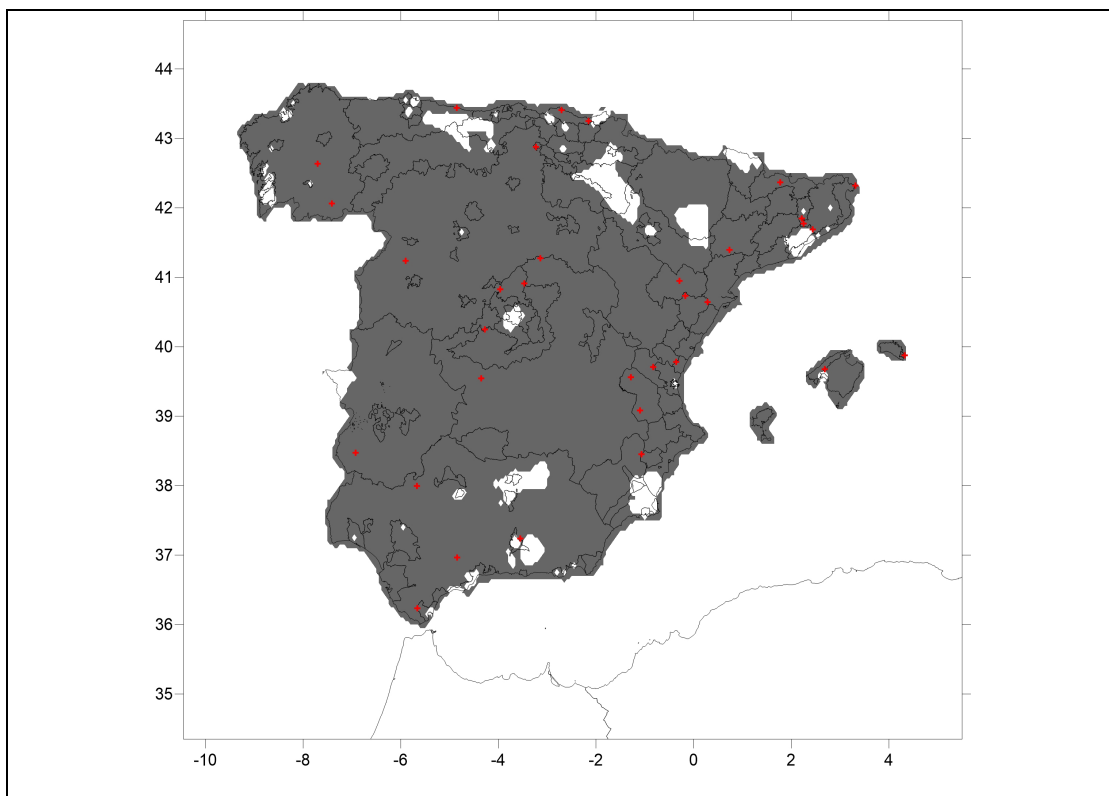


Figura 59. Cobertura espacial de estaciones rurales de fondo que registran PM2.5 en 2022 para concentraciones medias anuales. Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

La representatividad espacial 2022 del conjunto de estaciones rurales de fondo para **PM10** parece bastante buena (mejor para el PM10 anual) en gran parte de la Península y Baleares, pero hay zonas con ciertas deficiencias de cobertura, como es el caso de Andalucía, Castilla La Mancha, Murcia, Comunidad Valenciana, Madrid, Cataluña, Aragón, Navarra, La Rioja y Asturias (figura 50).

Para **SO₂** en 2022. Al igual que para el NO₂, las estaciones con su área de representatividad en su conjunto cubren muy bien las zonas no urbanas y no industriales del territorio en la mayoría de los casos. La mejor cobertura parece ser para el SO₂ anual, y la peor para el horario donde se ven zonas de tamaño considerable fuera de cobertura en norte, noreste y sobre todo en sureste (Este de Andalucía y Murcia) (Figura 51).

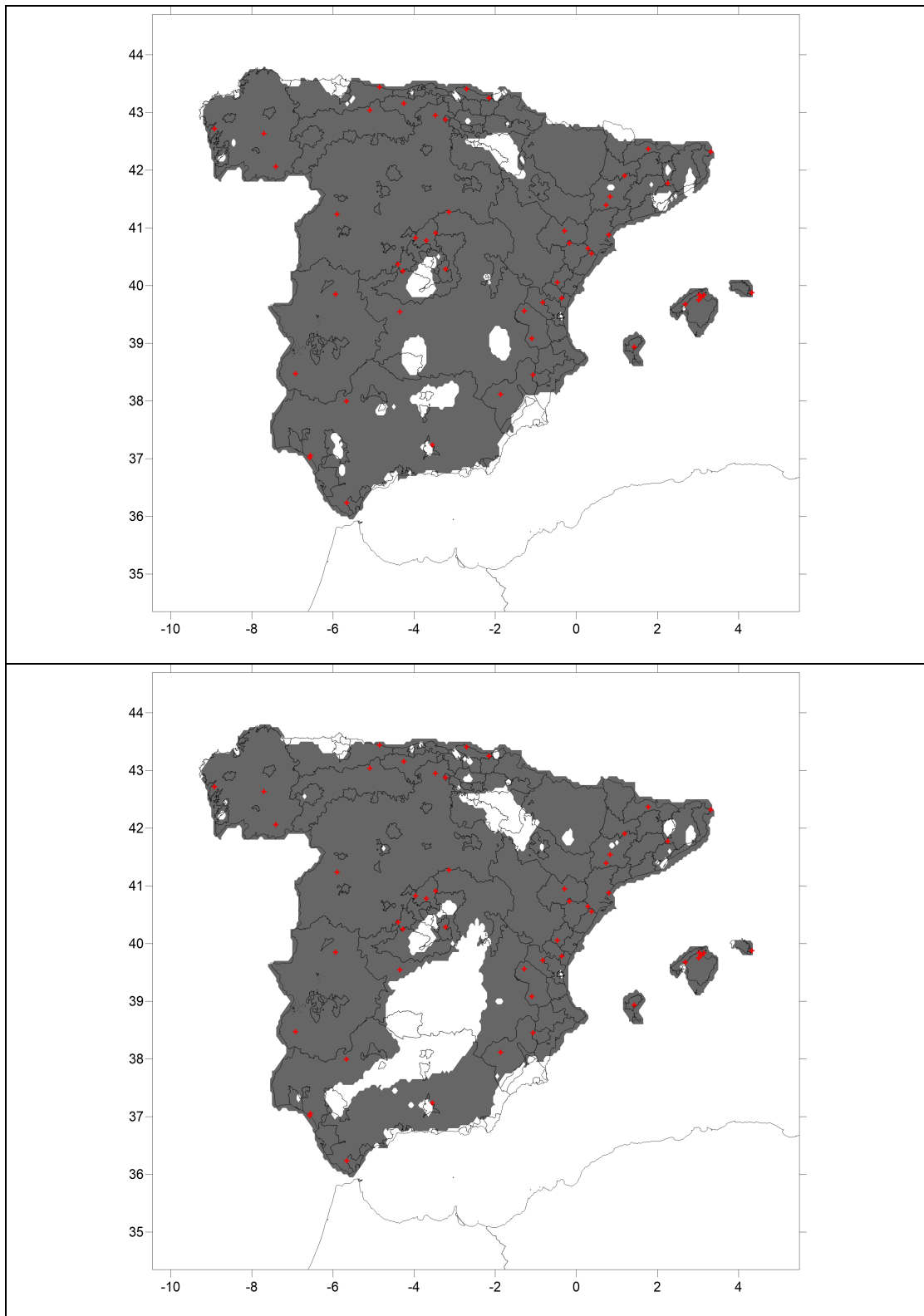


Figura 60. Cobertura espacial de estaciones rurales de fondo que registran PM10 en 2022 para concentraciones medias anuales (arriba) y para el 36º valor mayor de concentración diaria (abajo). Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

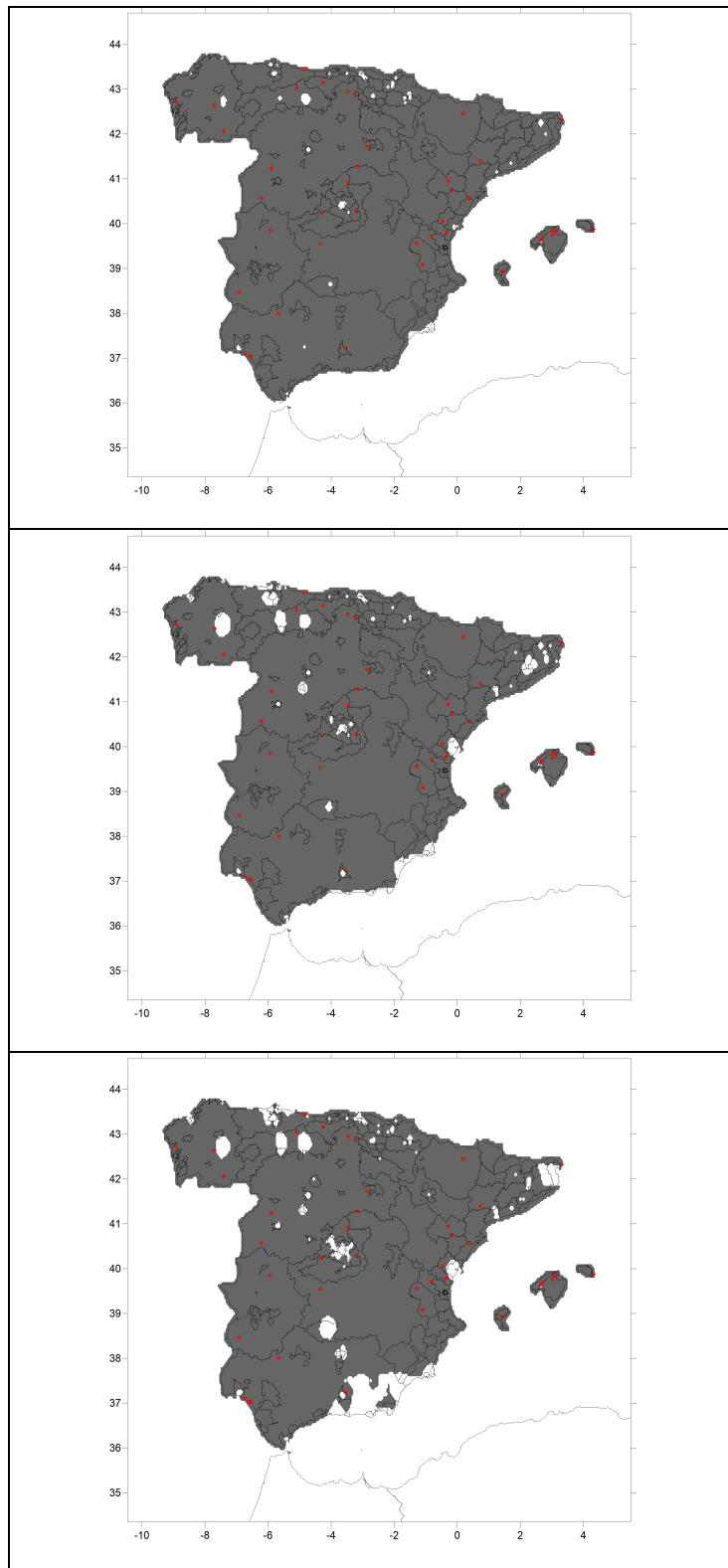


Figura 61. Cobertura espacial de estaciones rurales de fondo que registran SO₂ 2022 para concentraciones medias anuales (arriba), para el 4º valor mayor de concentraciones diarias (medio) y para el 25º valor mayor de concentración horaria (abajo). Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

7. REPRESENTATIVIDAD Y COBERTURA PLURIANUALES 2019-22 DE UBICACIONES DE ESTACIONES DE FONDO RURAL

El pasado año (Martín et al., 2021), se estimaron las áreas de representatividad espacial de las estaciones rurales de fondo para los años 2019 y 2020. En secciones anteriores, se han analizado las estimaciones de áreas de representatividad para 2022 siguiendo la misma metodología utilizada en años anteriores 2019, 2020 y 2021 (Martín et al., 2021 y 2022). En la presente sección, se analiza la representatividad espacial plurianual 2019-2022 de dicho tipo de estaciones considerada como la intersección de las áreas de representatividad de cada año tal como ya se estableció en Martín et al (2014). El cálculo se ha centrado separadamente en los indicadores anuales de concentración (concentración media anual) para el NO₂, PM10, PM2.5 y SO₂, y para el 26º valor mayor de concentración octohoraria de ozono.

Cada año el número de estaciones de calidad del aire operativas o con cobertura temporal de datos válidos no era la misma. Generalmente, el número de estaciones válidas aumenta ligeramente año a año (menos en 2022). Como para calcular la representatividad anual, se necesita tener la representatividad de cada año, y, como en algunos años no hay datos de algunas pocas estaciones, se ha decidido calcular la representatividad espacial de todas ubicaciones (ver Figuras 62-66) de estaciones rurales de fondo cada año considerando el total de estaciones operativas o con datos válidos en los 4 años estudiados (2019-2022) y computar la representatividad plurianual como la intersección de áreas de cada año. De esta forma, se ha calculado la representatividad espacial plurianual para cada contaminante para los indicadores de concentración arriba mencionados.

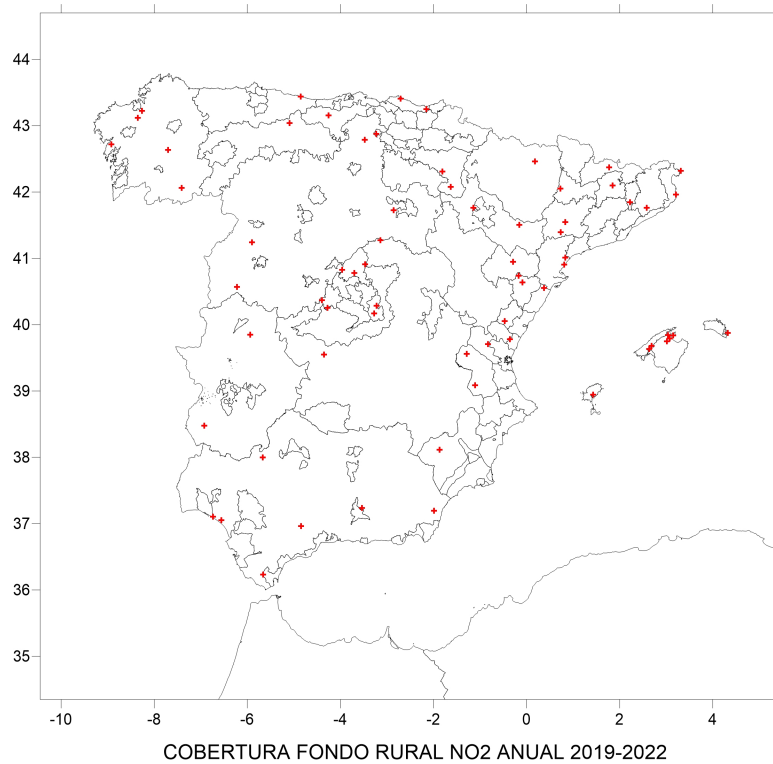


Figura 62. Mapa de las 67 ubicaciones rurales de fondo para NO₂ en 2019-21.

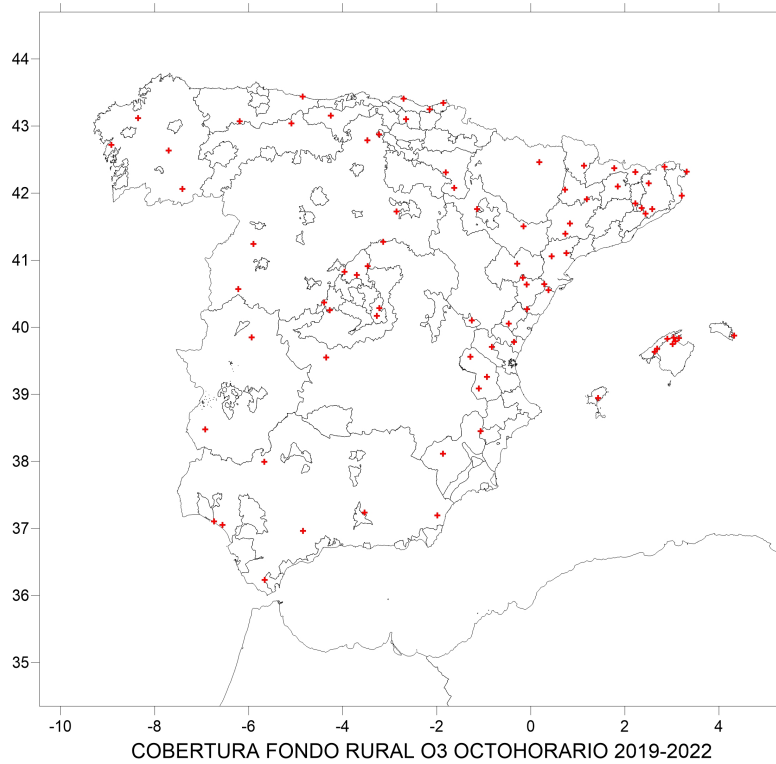


Figura 63. Mapa de las 82 ubicaciones rurales de fondo para O₃ en 2019-21.

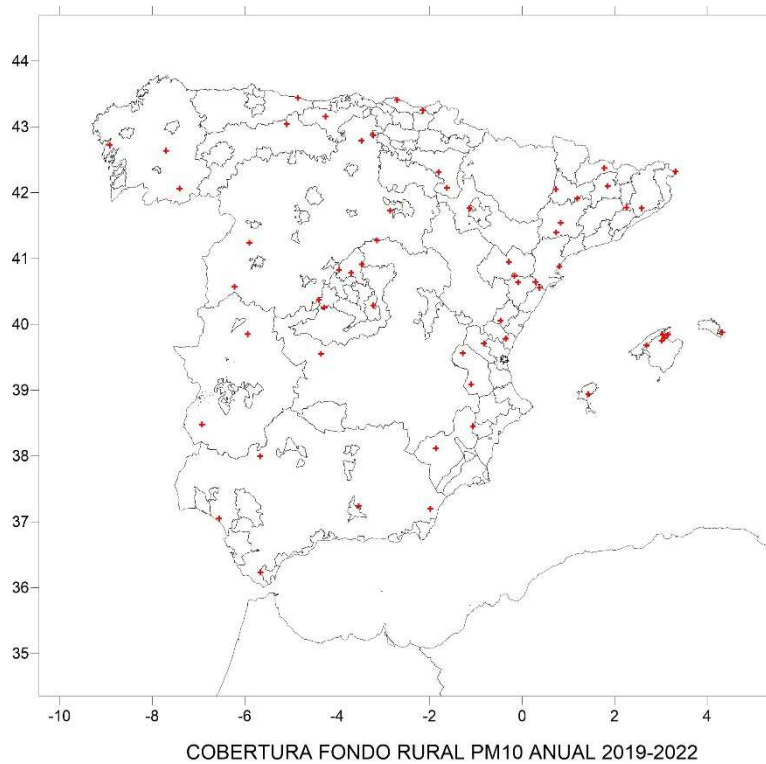


Figura 64. Mapa de las 60 ubicaciones rurales de fondo para PM10 en 2019-21.

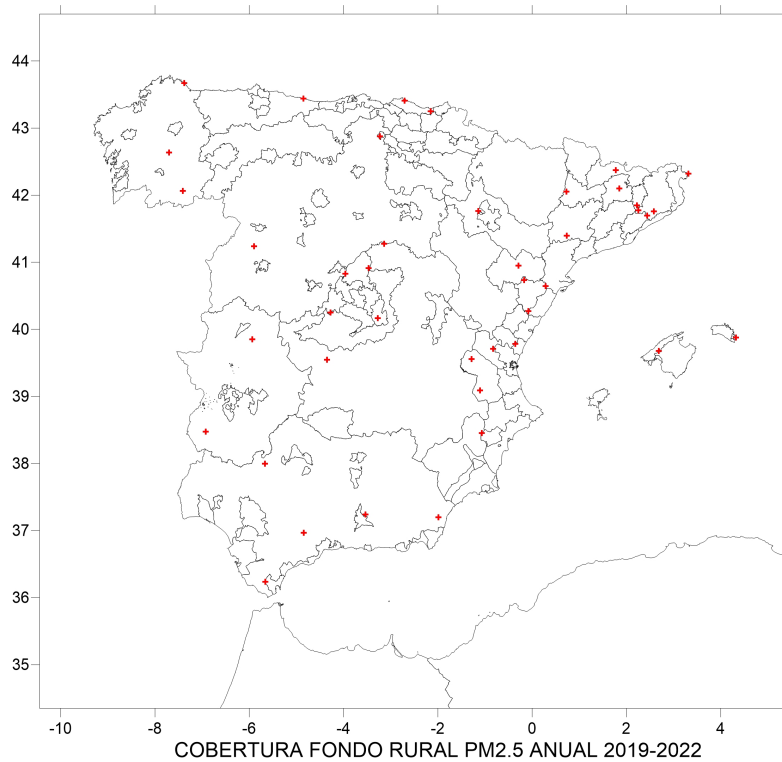


Figura 65. Mapa de las 42 ubicaciones rurales de fondo para PM2.5 en 2019-21.

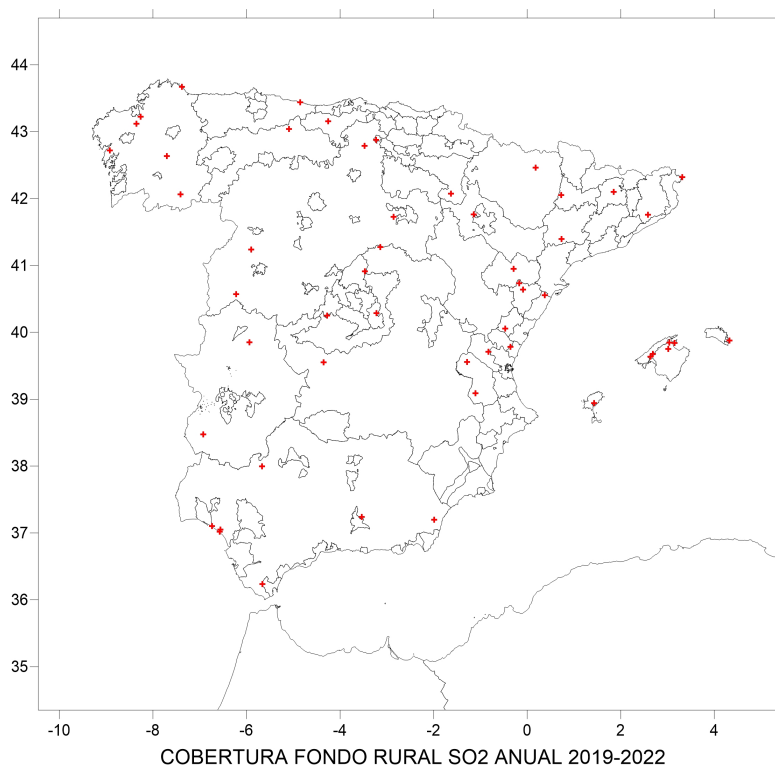


Figura 66. Mapa de las 52 ubicaciones rurales de fondo para SO₂ en 2019-21.

Las áreas de representatividad espacial plurianual son más pequeñas que las de la representatividad individual de cada año como resultado del proceso de intersección de las áreas de cada año que no son exactamente coincidentes. No obstante, en muchos casos las diferencias entre la representatividad plurianual y la anual es pequeña, como puede apreciarse en los casos mostrados para el **NO₂ anual** (comparen figuras 67-70 y figuras 9-12). Esto indicaría que las áreas de representatividad espacial son bastante estables y cambian poco de año en año.

En el caso del **ozono octohorario**, hay estaciones, como Noia (Figura 73), en las que el área de representatividad plurianual es muy similar a las anuales (Figura 25), en otras el área plurianual es significativamente menor como en San Martín y Campillo (comparen Figuras 71-72 y 23-24), y en otras el cambio es radical con áreas plurianuales muy pequeñas como son el caso de Cirat (Figuras 74 y 26). Estos casos últimos indican una gran variabilidad interanual en las áreas de representatividad espacial y como se verá en siguientes secciones baja persistencia.

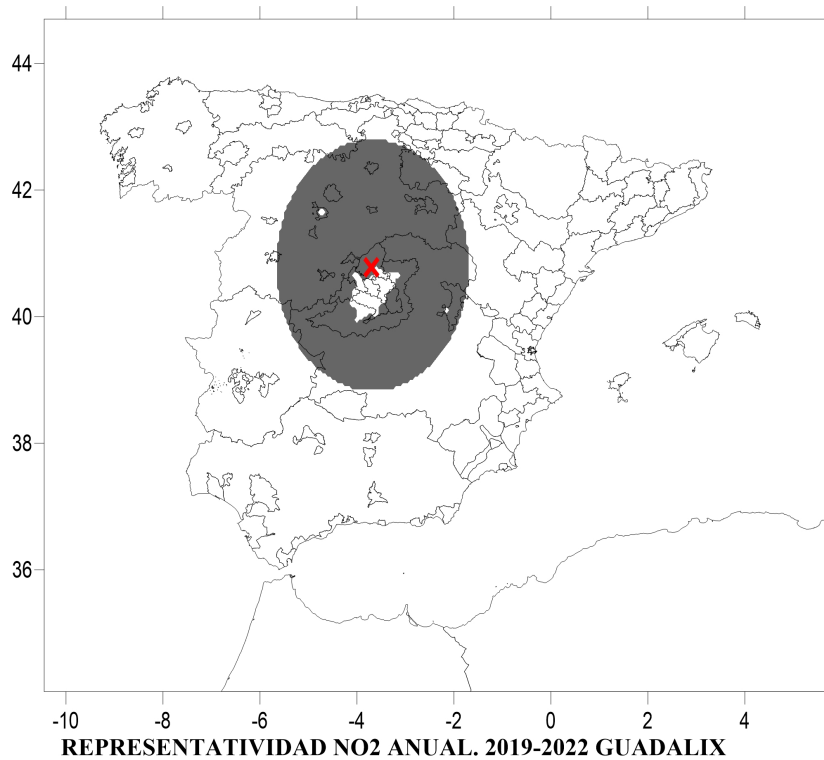


Figura 67. Área de representatividad de la ubicación de Guadalix para el NO₂ anual 2019-22

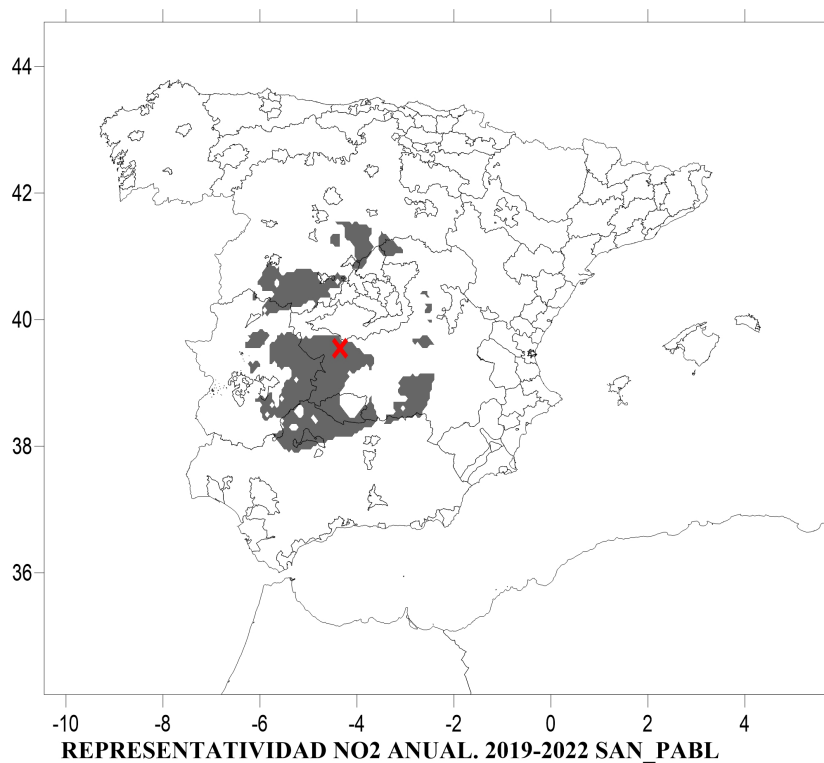


Figura 68. Área de representatividad de la ubicación de San Pablo para el NO₂ anual 2019-22

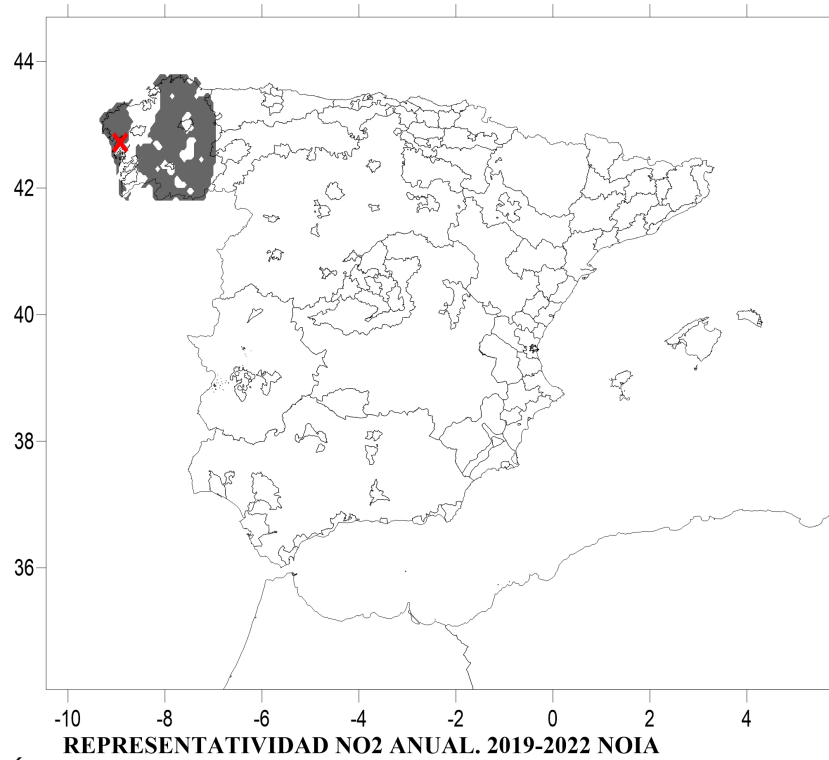


Figura 69. Área de representatividad de la ubicación de Noia para el NO₂ anual 2019-21

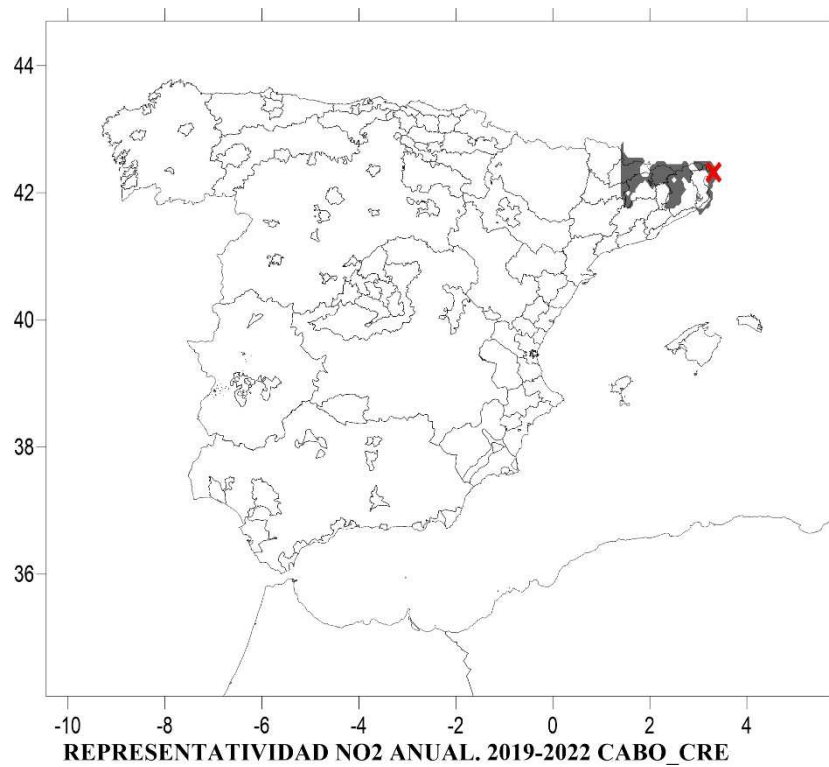
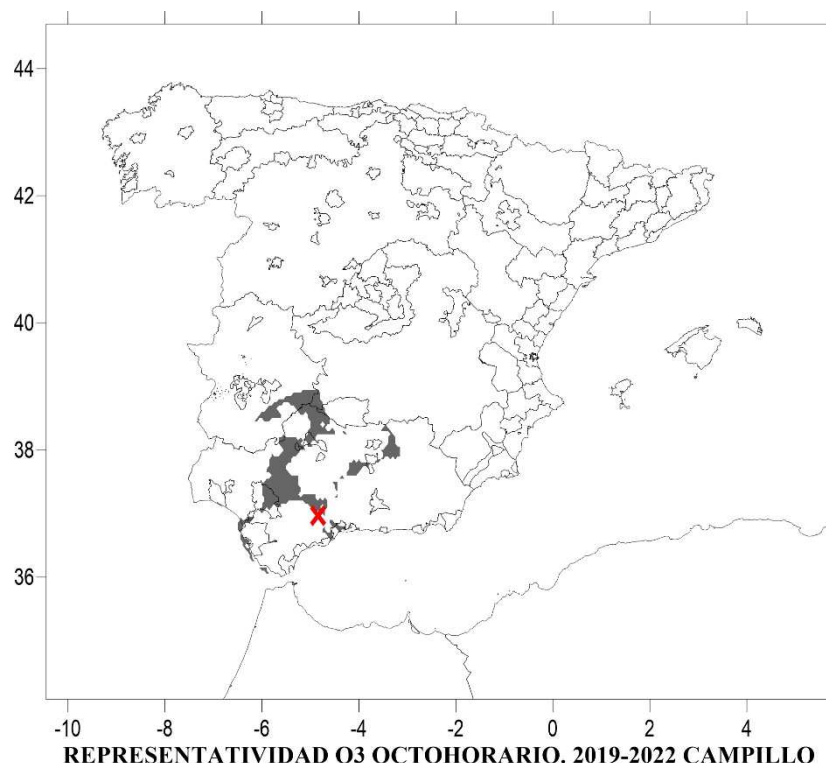


Figura 70. Área de representatividad de la ubicación de Cabo Creus para el NO₂ anual 2019-22



REPRESENTATIVIDAD O3 OCTO HORARIO. 2019-2022 SAN_MART

Figura 71. Área de representatividad de la ubicación de San Martín para el O₃ octohorario 2019-22



REPRESENTATIVIDAD O3 OCTO HORARIO. 2019-2022 CAMPILLO

Figura 72. Área de representatividad de la ubicación de Campillo para el O₃ octohorario 2019-22

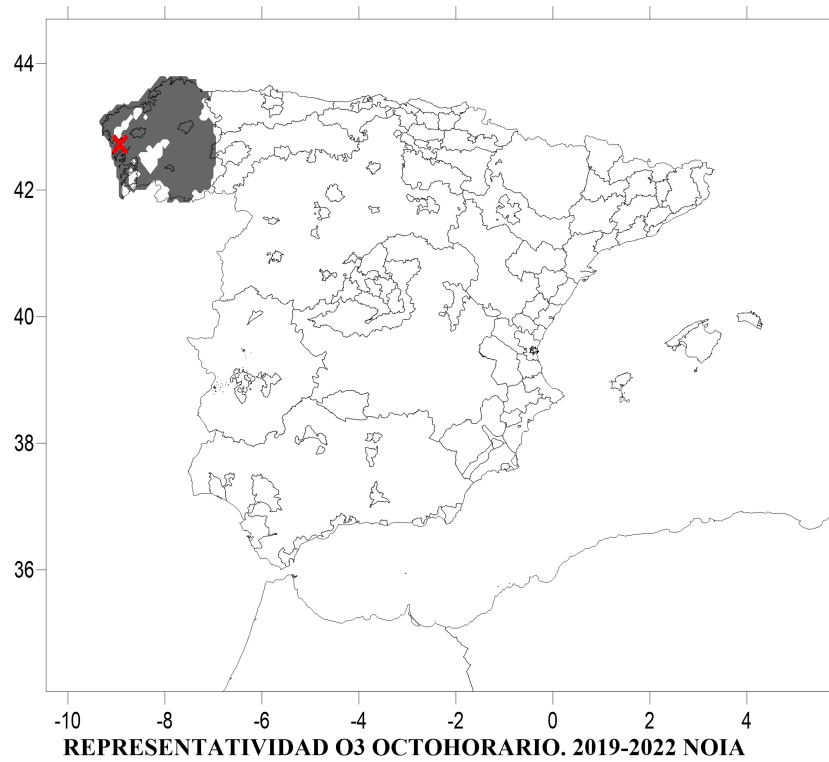


Figura 73. Área de representatividad de la ubicación de Noia para el O₃ octohorario 2019-22

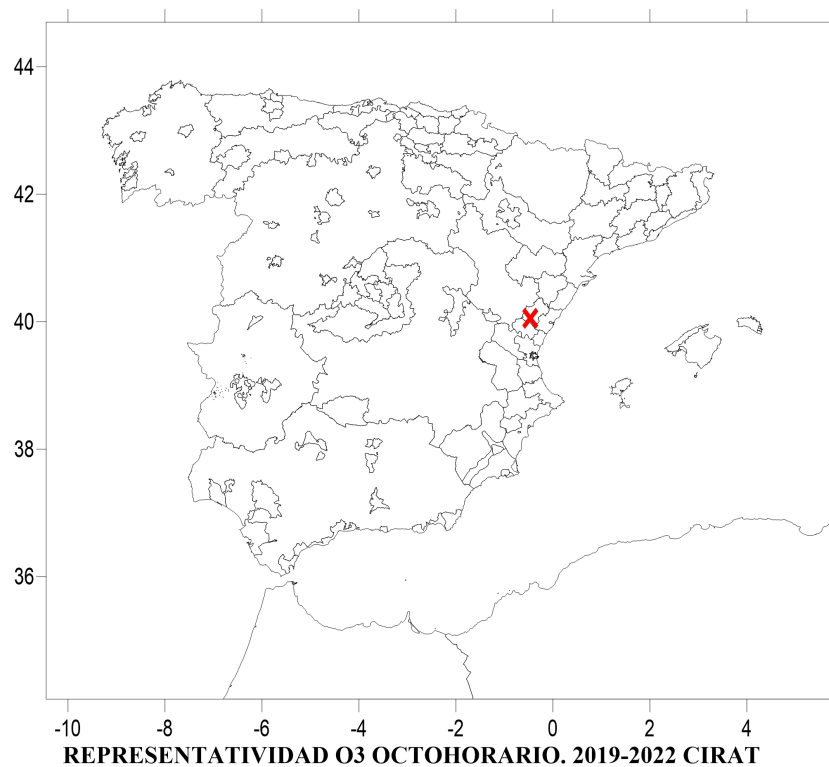


Figura 74. Área de representatividad de la ubicación de Cirat para el O₃ octohorario 2019-22

Para el **PM2.5 anual**, tenemos igualmente casos donde la representatividad plurianual aun siendo más pequeña tiene bastante semejanza con la representatividad anual como es el caso de Hospital (Figura 76 frente a las Figura 29) mostrando más bien poca variabilidad interanual. Hay otras ubicaciones donde el área es bastante más pequeña y diferente con cambios muy radicales como en Mundaka y Niembro (Figura 77-78 frente a 30-31) indicando una gran variabilidad interanual. Barcarrota estarían en un caso intermedio (ver Figuras 75 y 28).

En cuanto al **PM10 anual**, los cuatro ejemplos mostrados muestran áreas de representatividad espacial plurianual claramente más pequeñas que las de 2022 (figuras 79-82 frente a 34-37), lo que indica una fuerte variabilidad interanual, es decir, no hay mucha persistencia en las áreas de representatividad de un año a otro.

En el caso del **SO₂ anual**, en la mayoría de los casos, las áreas de representatividad espacial plurianual son muy parecidas a las de 2022 mostrando mucha persistencia y constancia año a año (Figuras 83-86 frente a las Figuras 45-48).

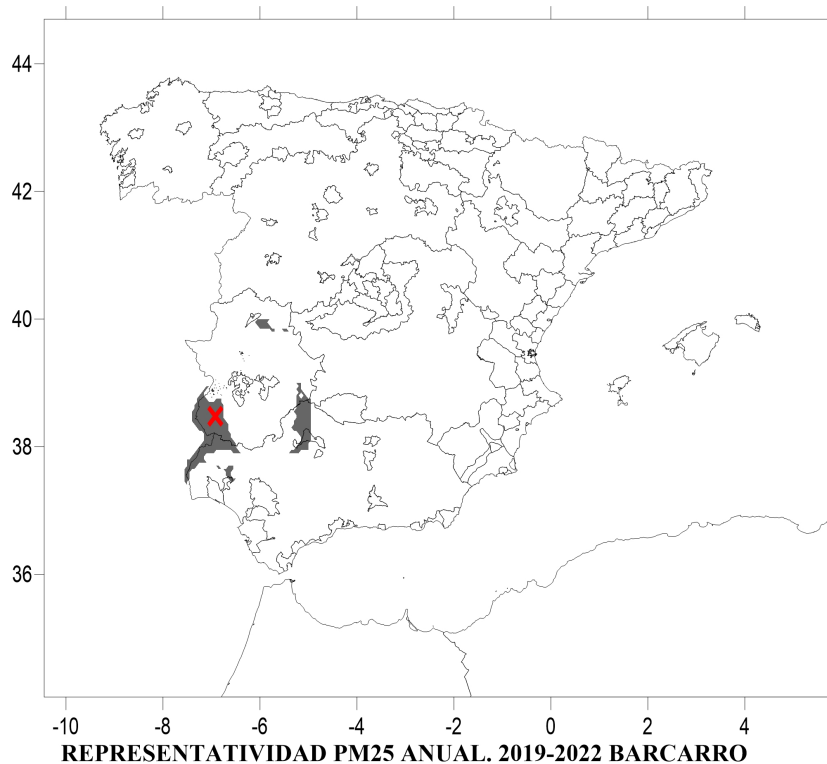


Figura 75. Área de representatividad de la ubicación de Barcarrota para el PM2.5 anual 2019-22

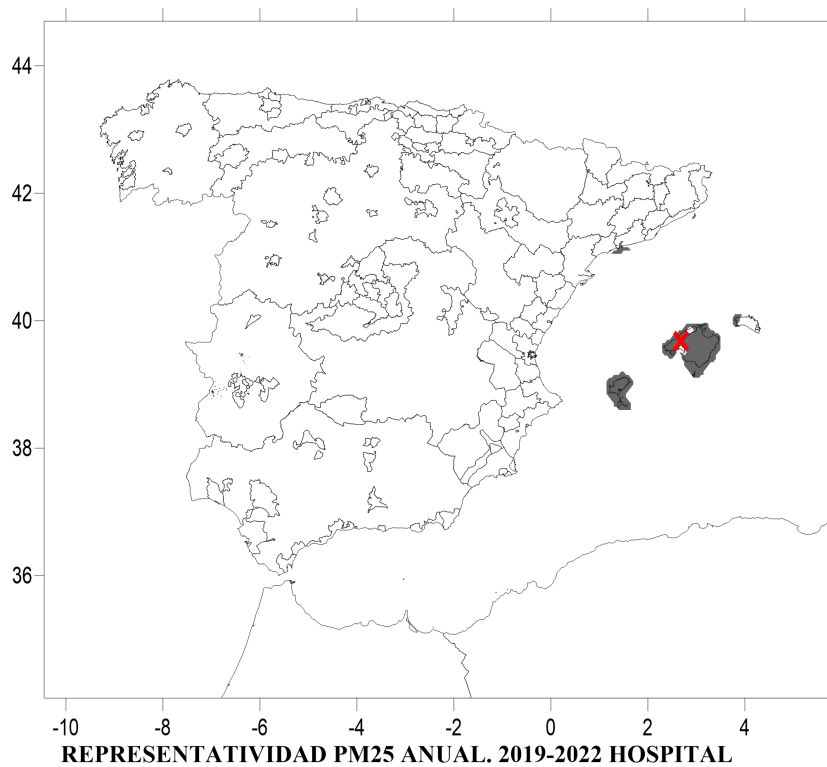


Figura 76. Área de representatividad de la ubicación de Hospital para el PM2.5 anual 2019-22

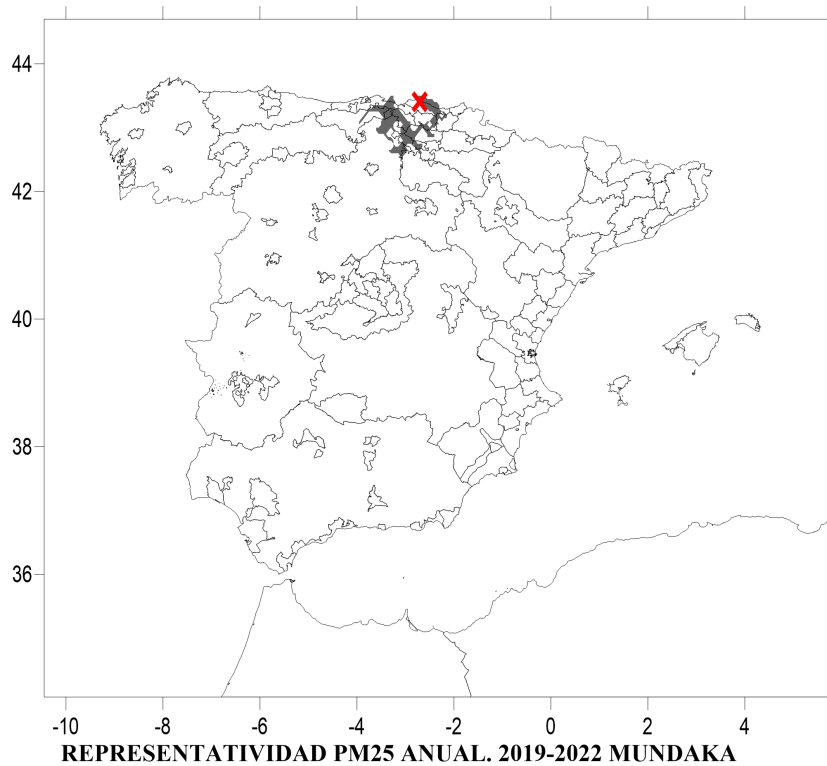


Figura 77. Área de representatividad de la ubicación de Mundaka para el PM2.5 anual 2019-22

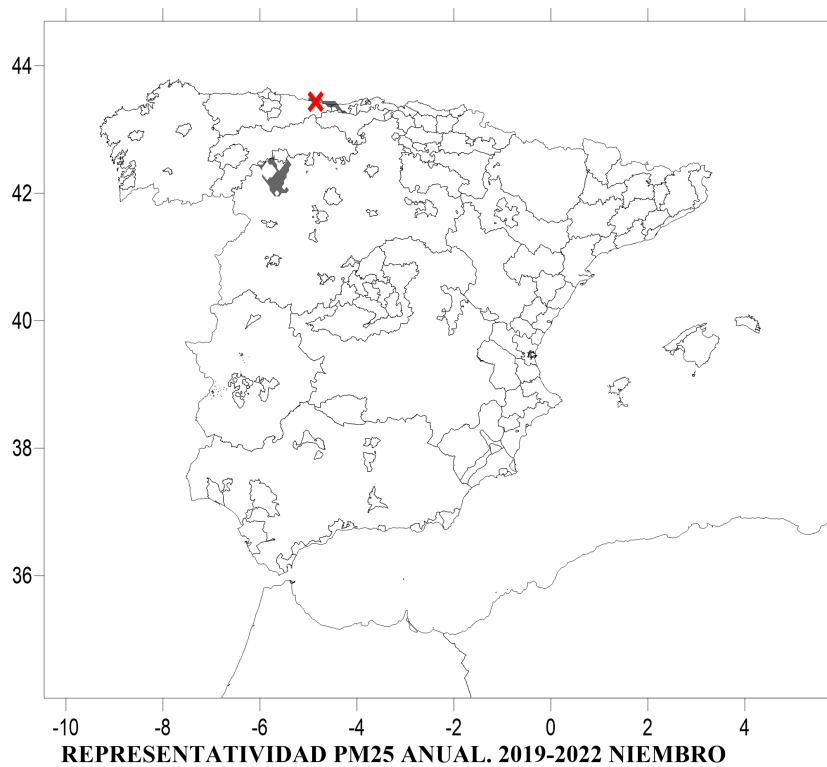


Figura 78. Área de representatividad de la ubicación de Niembro para el PM2.5 anual 2019-22

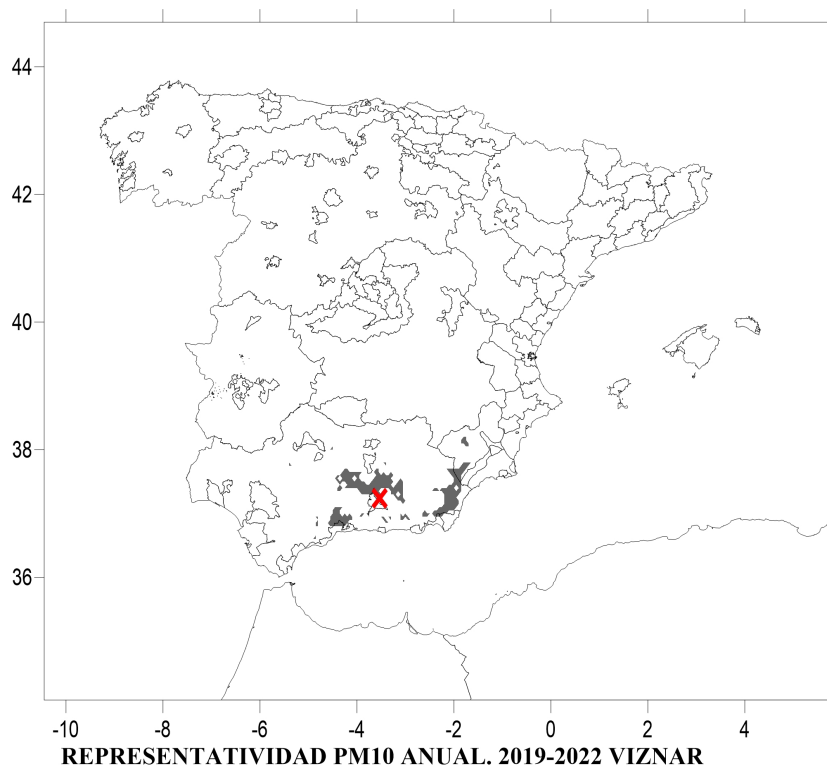


Figura 79. Área de representatividad de la ubicación de Viznar para el PM10 anual 2019-22



Figura 80. Área de representatividad de la ubicación de Caravaca para el PM10 anual 2019-22

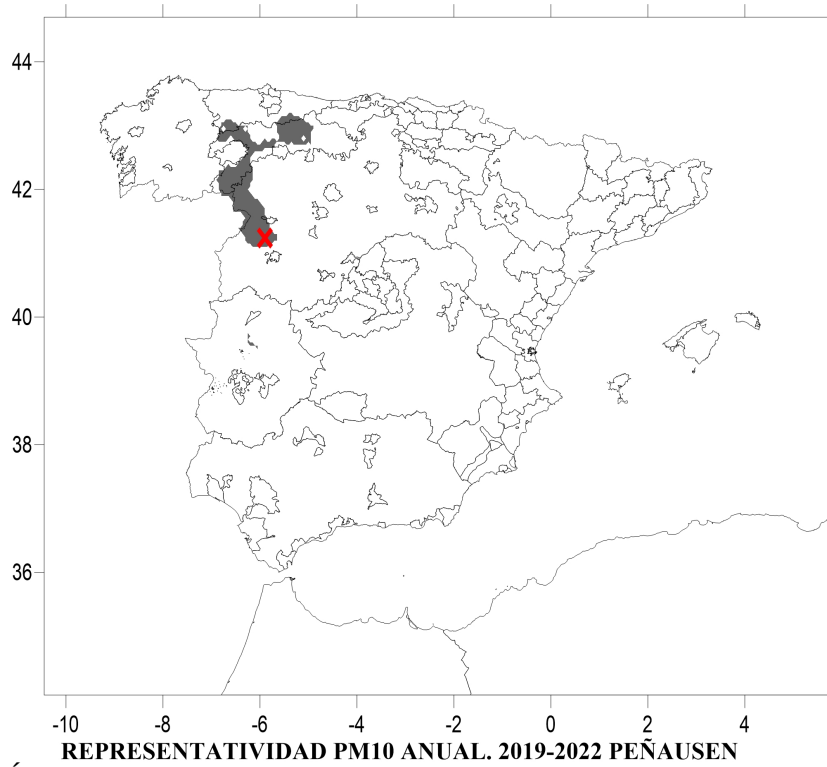


Figura 81. Área de representatividad de la ubicación de Peñausende para el PM10 anual 2019-22

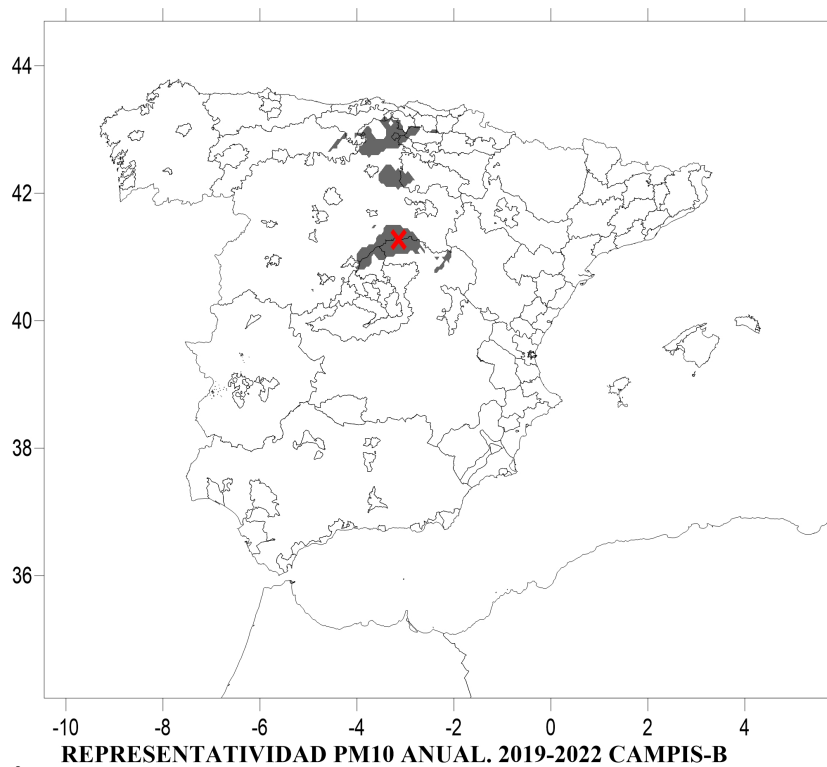


Figura 82. Área de representatividad de la ubicación de Campisábalos para el PM10 anual 2019-22

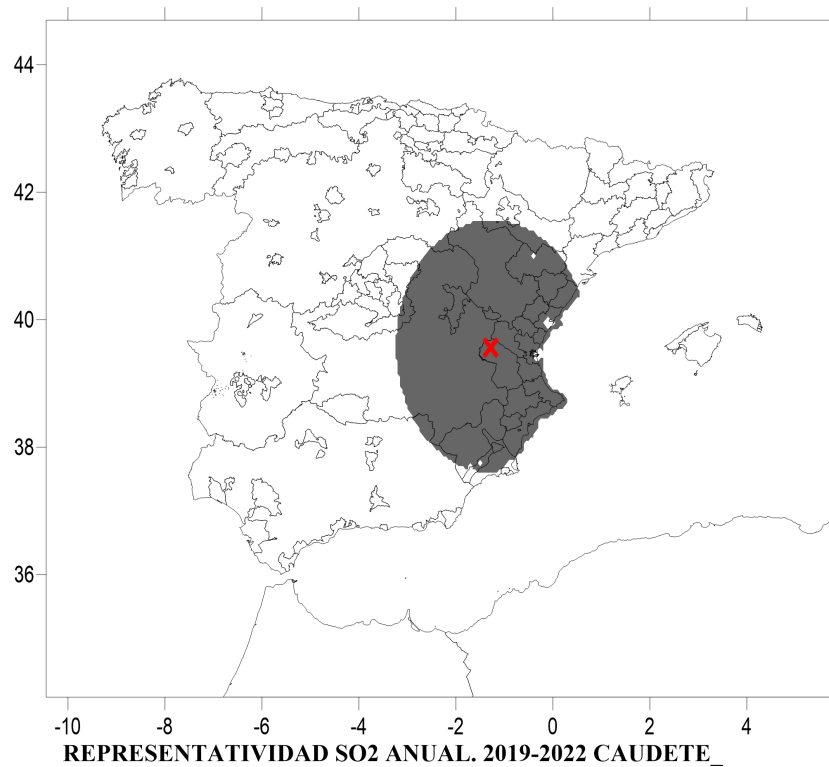


Figura 83. Área de representatividad de la ubicación de Caudete para el SO₂ anual 2019-22

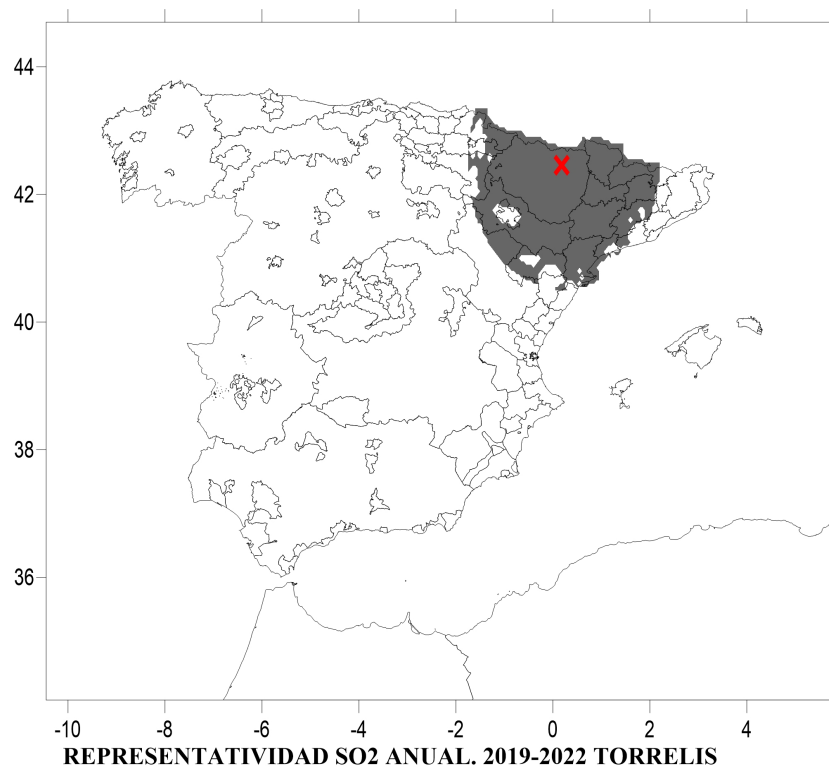


Figura 84. Área de representatividad de la ubicación de Torrelisa para el SO₂ anual 2019-22

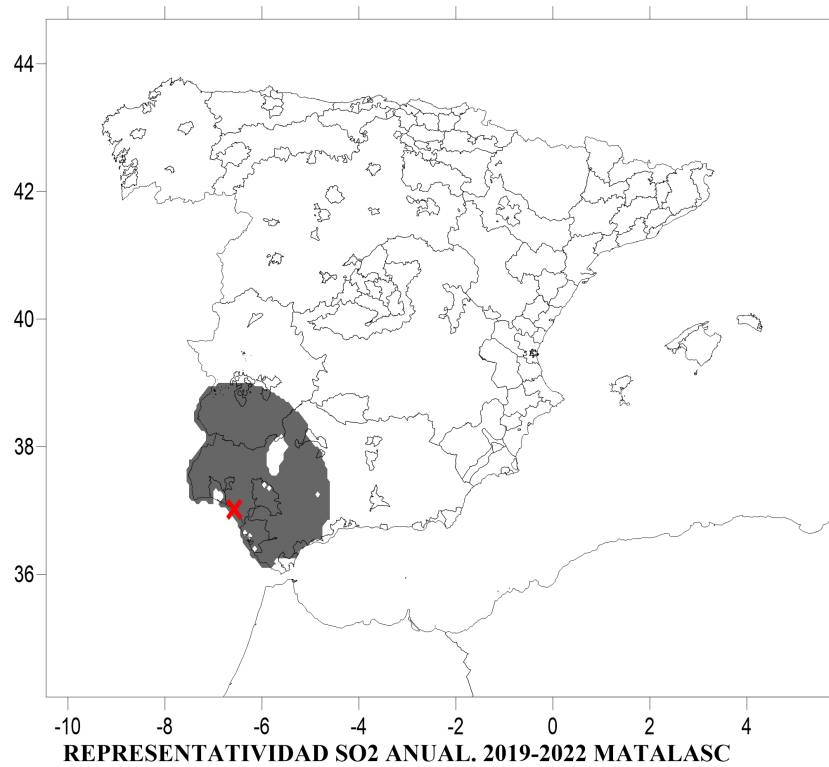


Figura 85. Área de representatividad de la ubicación de Matalascañas para el SO₂ anual 2019-22

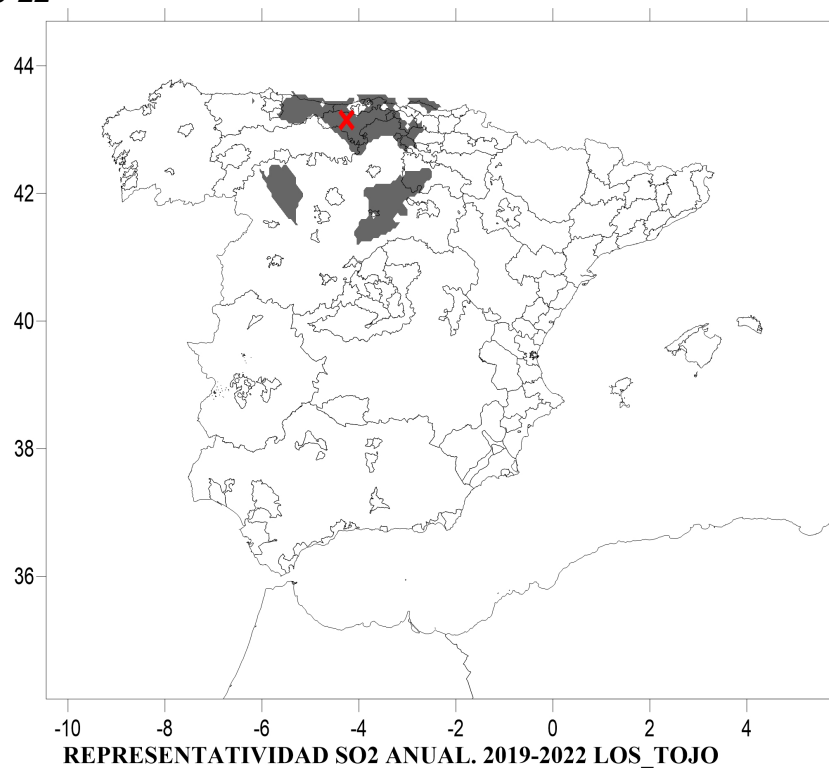


Figura 86. Área de representatividad de la ubicación de Los Tojos para el SO₂ anual 2019-22

La **cobertura espacial plurianual** del conjunto de ubicaciones para la medida para cada contaminante para el periodo 2019-22 se ha calculado sumando las representatividades espaciales plurianuales de todas las estaciones. A continuación (Figuras 87-91), se muestran las coberturas espaciales plurianuales del conjunto de ubicaciones rurales de fondo de la España Peninsular y Baleares para cada contaminante y tiempo de promedio (anual, diario, horario y octohorario) para el periodo 2019-22.

Las coberturas plurianuales 2019-22 para el **NO₂** y **SO₂ anuales** son muy buenas, ya que cubren casi todo el territorio exceptuando zonas urbanas y alguna zona industrial o de centrales térmicas (Figura 87 y 91) siendo muy similar a la de los años individuales (ver Figuras 57 y 61). En cambio, para los demás contaminantes la cobertura presenta zonas no cubiertas de extensión considerable. Es más acentuado en el caso del **PM_{2.5} anual** (Figura 88) seguido del **ozono octohorario** (Figura 89) y, en menor medida para el **PM₁₀ anual** (Figura 90). En estos 3 casos, la cobertura plurianual es claramente menor que la del año 2022 (ver Figuras 58-60). Estos resultados están en consonancia con lo apreciado al analizar las áreas de representatividad de cada estación. Los resultados del estudio de persistencia que se mostrarán en la siguiente sección ahondan en esta cuestión.

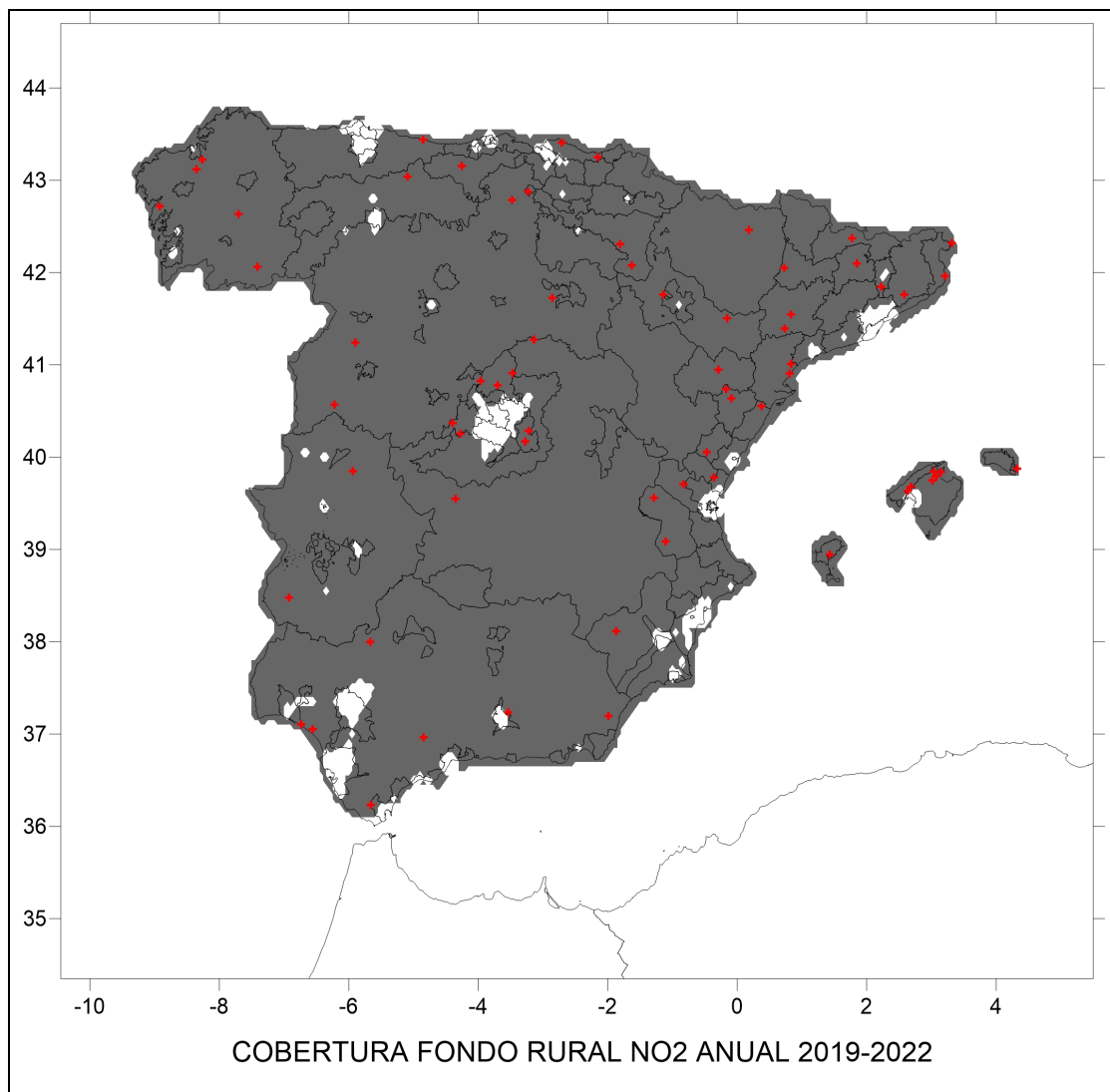


Figura 87. Cobertura espacial plurianual de ubicaciones rurales de fondo para NO₂ en 2019-22 para concentraciones medias anuales. Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

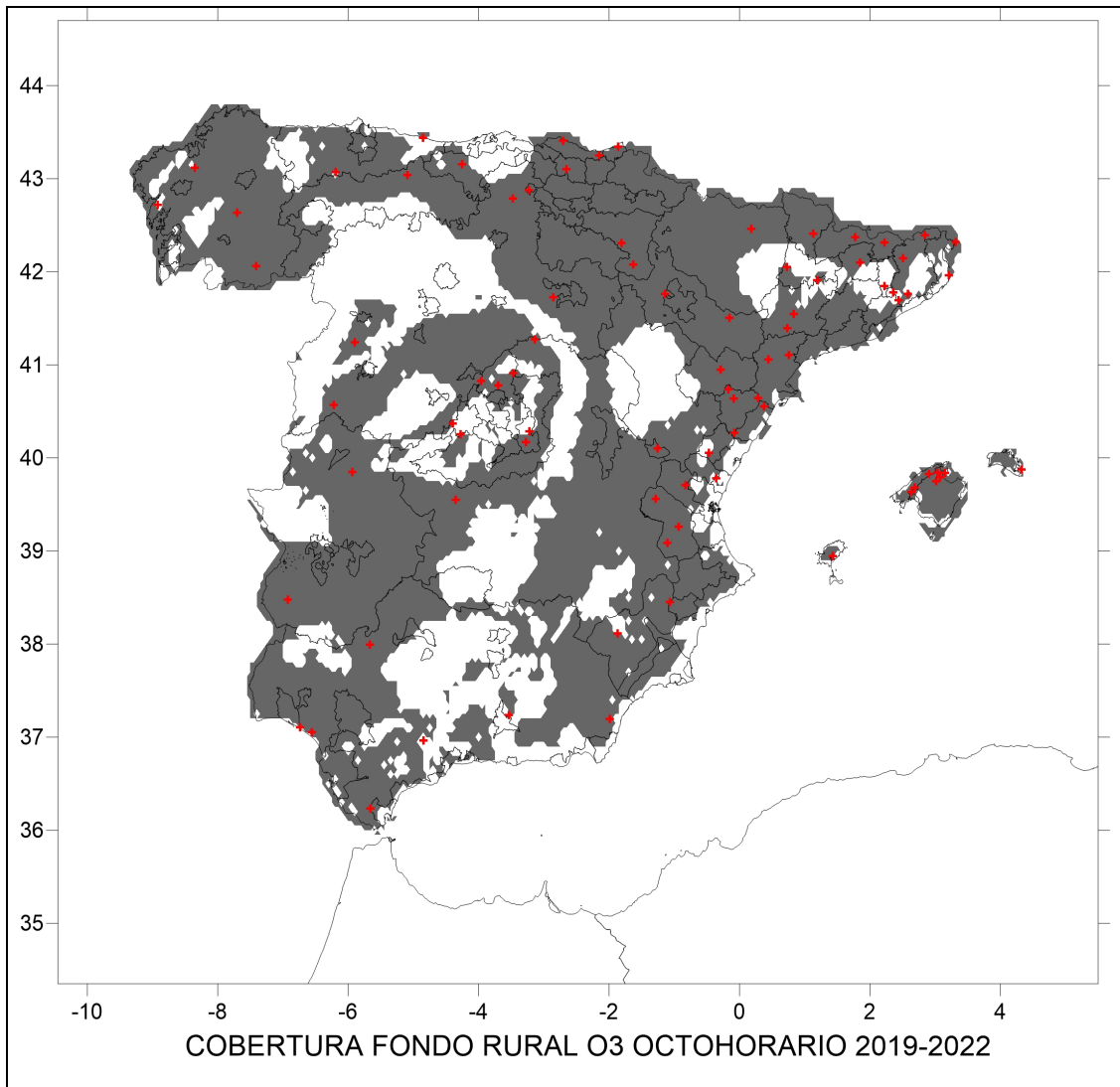


Figura 88. Cobertura espacial plurianual de ubicaciones rurales de fondo para O₃ en 2019-22 para el 26º valor mayor de concentración octohoraria (abajo). Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

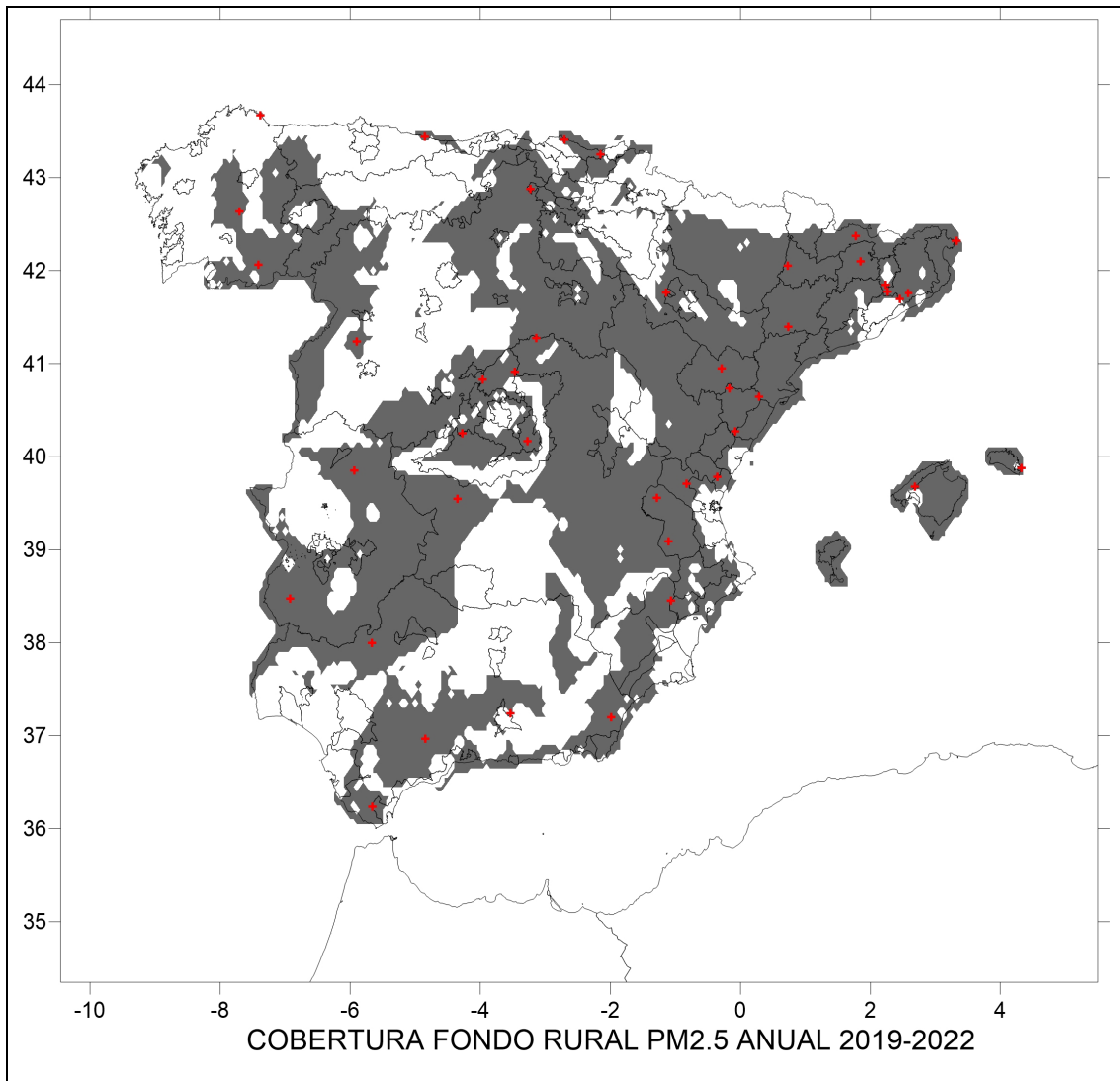


Figura 89. Cobertura espacial plurianual de ubicaciones rurales de fondo para PM2.5 en 2019-22 para concentraciones medias anuales. Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

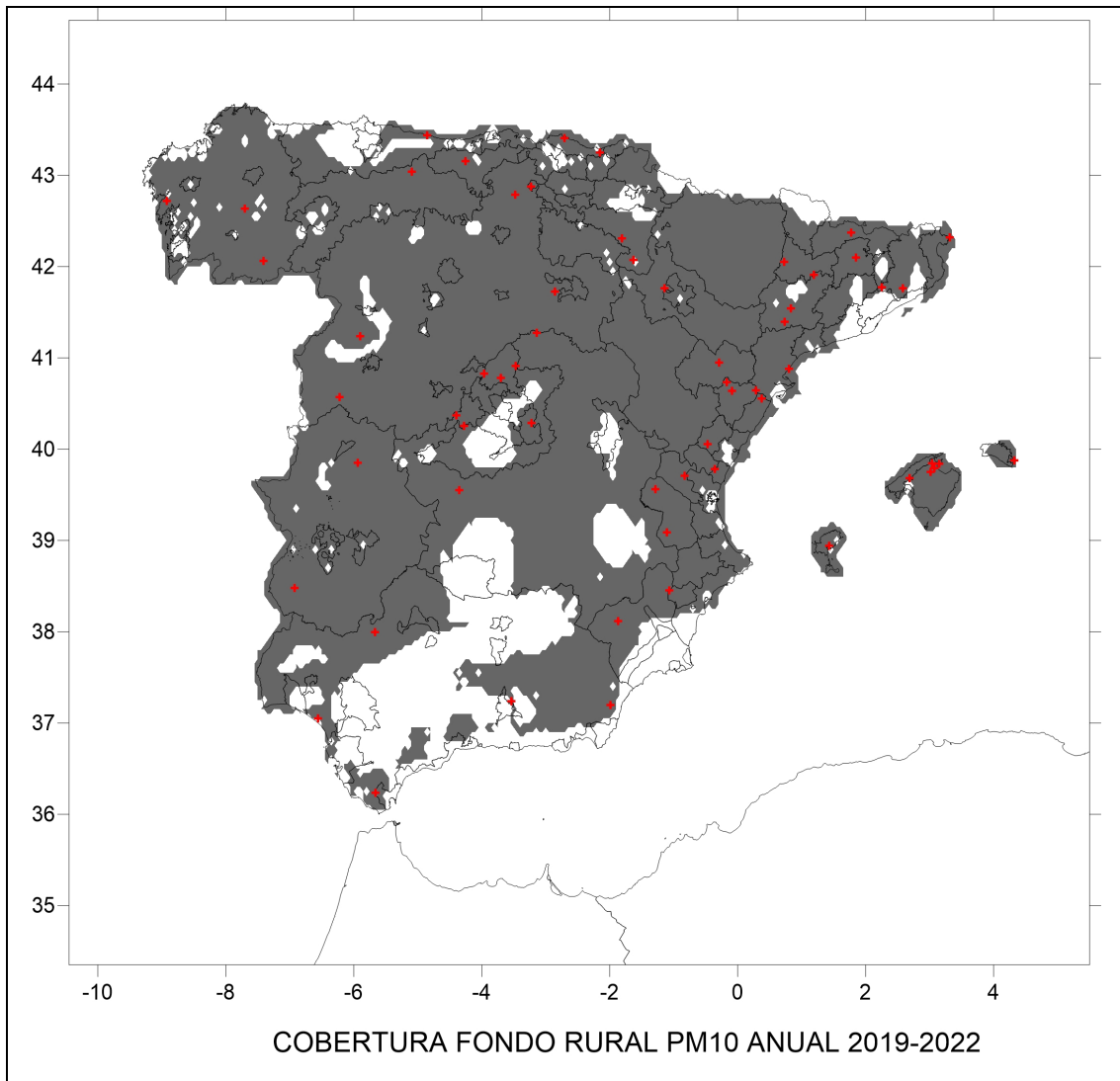


Figura 90. Cobertura espacial plurianual de ubicaciones rurales de fondo para PM10 en 2019-22 para concentraciones medias anuales. Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

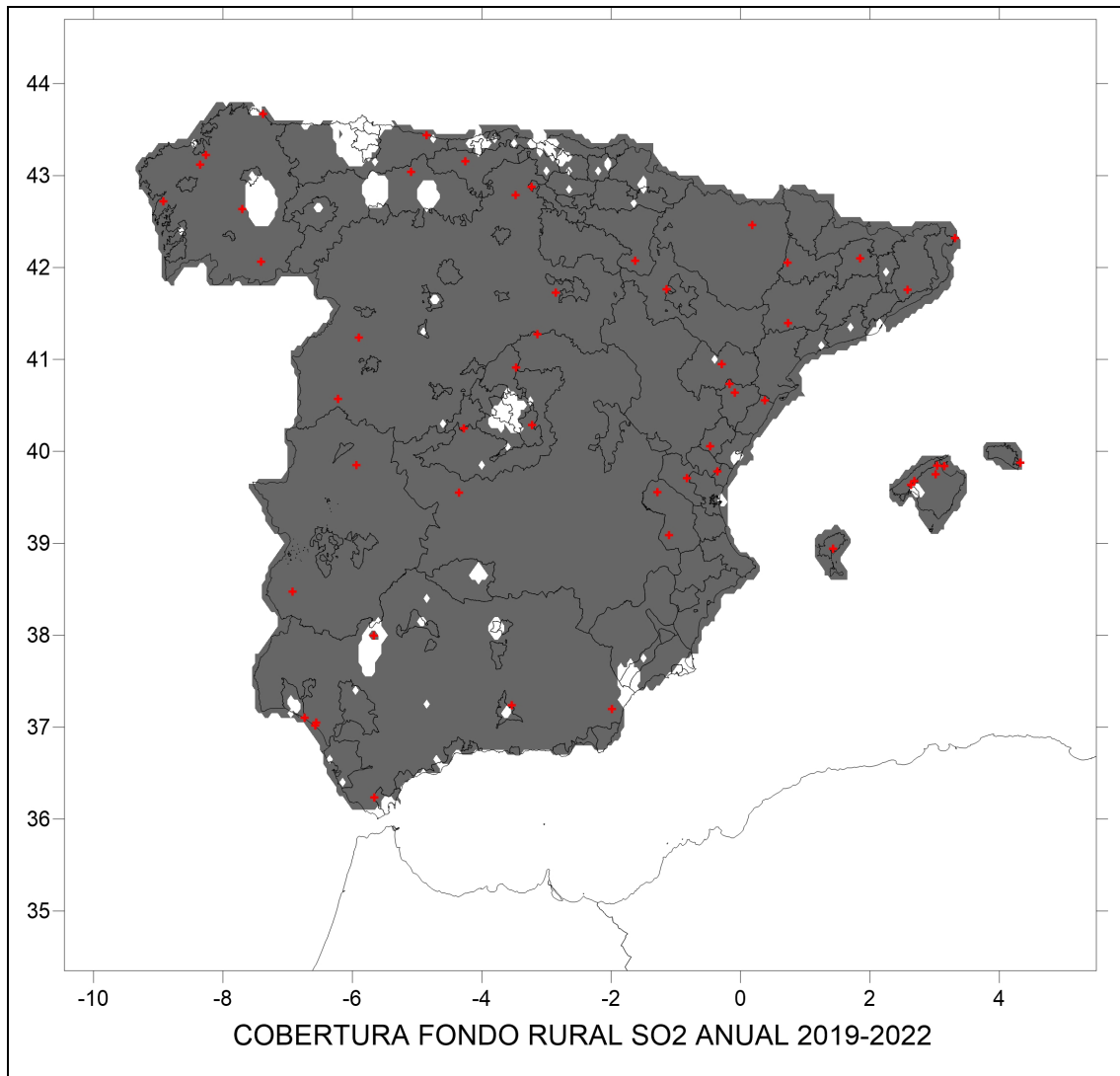


Figura 91. Cobertura espacial plurianual de ubicaciones rurales de fondo para SO₂ 2019-22 para concentraciones medias anuales. Las cruces rojas indican la ubicación de estaciones de medida.

8. ANALISIS DE PERSISTENCIA DE AREAS DE REPRESENTATIVIDAD

Siguiendo la metodología descrita en Martín et al (2014), se ha analizado la persistencia de las áreas de representatividad espacial de estaciones de calidad del aire de fondo rural para el periodo 2019-22. Esta metodología se basa en el índice de persistencia P que se define como

$$P = \min \left[\frac{SR_T}{SR_Y} \right] \quad (1)$$

donde SR_Y es el área de representatividad espacial de una estación para el año Y (2019, 2020, 2021 o 2022) y SR_T es el área de representatividad espacial del conjunto de los 4 años de la misma estación, es decir, la intersección de SR_Y de cada año Y . P varía entre 0 y 1; 0 significa que no hay persistencia en el área de representatividad, mientras que 1 indica el área de representatividad es el mismo durante los cuatro años. Es importante subrayar que se ha elegido el factor P como el mínimo de los cuatro posibles, ya que el objetivo de este estudio era capturar los cambios más radicales de las áreas de representatividad espacial.

En los próximos párrafos, se analizarán los grados de persistencia en las áreas de representatividad, como cambia año a año la distribución de tamaños relativos de las áreas de representatividad espacial y se compara con la distribución de tamaño relativo de las representatividades plurianuales (2019-22). Recordemos que los tamaños son relativos al tamaño máximo posible de las áreas de representatividad espacial que están limitados por costas, fronteras internacionales y el radio máximo asumido (2º que equivale a unos 200 Km).

Para **SO₂ anual**, vemos que son mayoría los casos de persistencia superior a 0.8 (30 estaciones, más del 58%), aunque unas 12 estaciones con una persistencia inferior a 0.2 (Figura 92). Si se analizan las distribuciones de tamaños relativos de las áreas de representatividad, se ve que apenas hay cambio de año a año (Figura 94) y se parecen mucho a la distribución de

tamaños de áreas de representatividad plurianual (Figura 93) dominando los tamaños grandes.

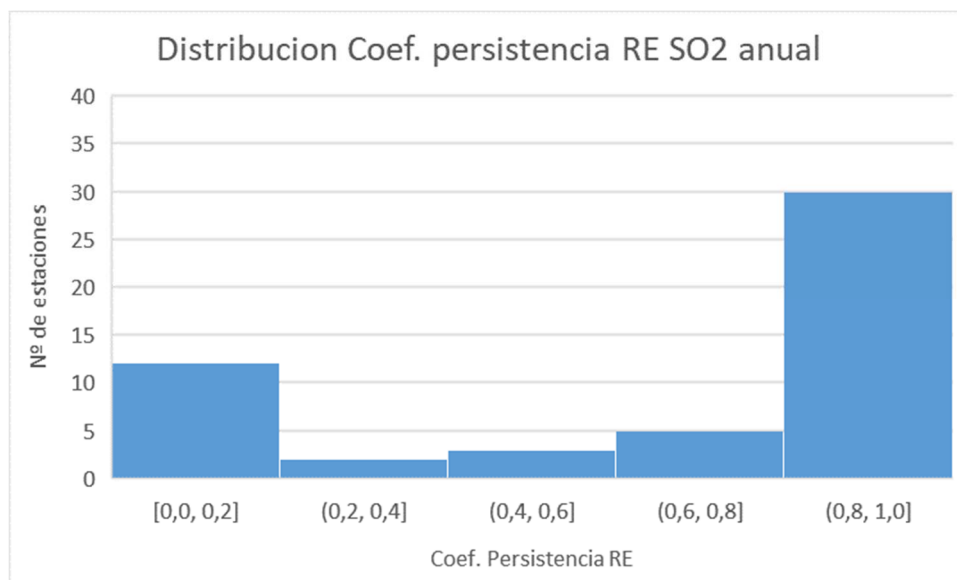


Figura 92. Histograma de distribución de índices de persistencia de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el SO₂ anual

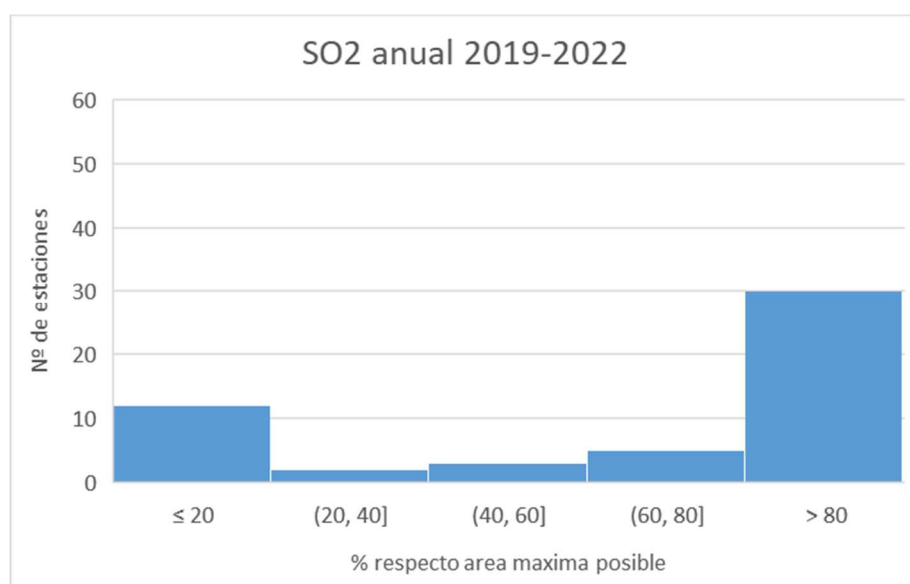


Figura 93. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el SO₂ anual

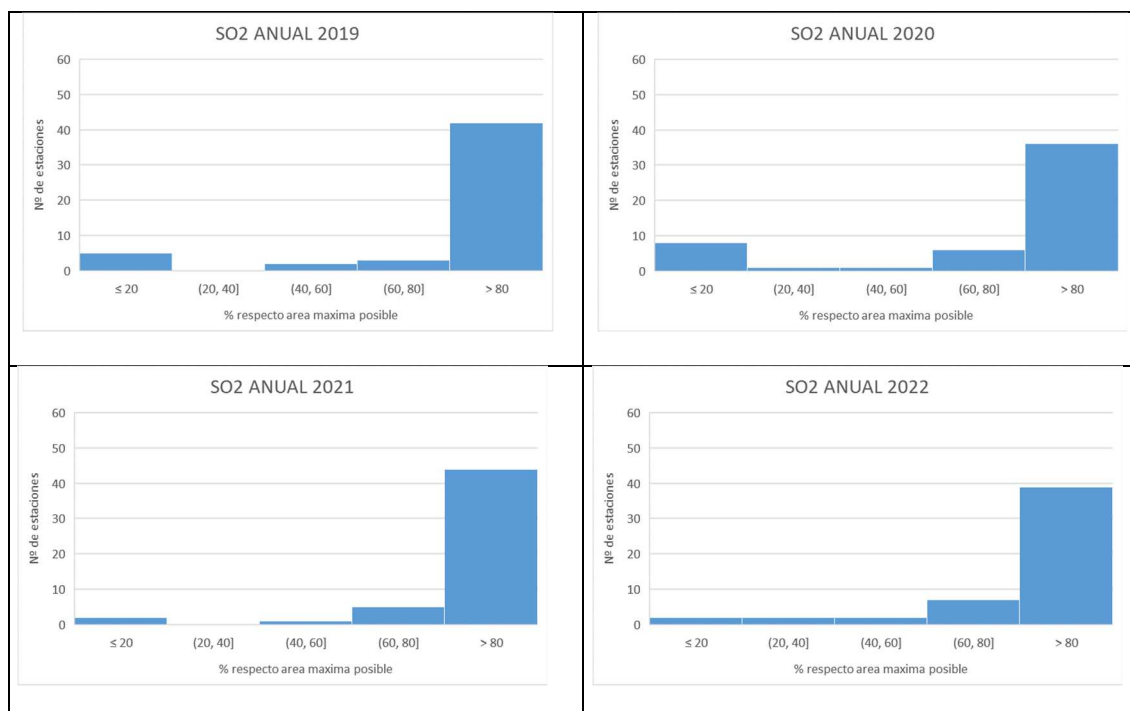


Figura 94. Histogramas de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual para los años 2019, 2020, 2021 y 2022 para el SO_2 anual considerando todas las estaciones operativas en esos años.

La persistencia de áreas de representatividad espacial para el **NO_2 anual** es incluso mayor que para el **SO_2 anual**, con 47 estaciones con persistencia mayor de 0.8 y 20 casos con persistencia menor de 0.8 (Figura 95). También las distribuciones de tamaños relativos de las áreas de representatividad plurianual (Figura 96) y años a año (Figura 97) son muy similares con una clara dominancia de tamaños relativos grandes (al menos 50 estaciones tienen un tamaño relativo superior al 60% posible).

Las áreas de representatividad para estos dos contaminantes (**NO_2 anual y SO_2 anual**) tienen unas características de tamaño y persistencia muy diferentes a los contaminantes que vamos a ver a continuación.

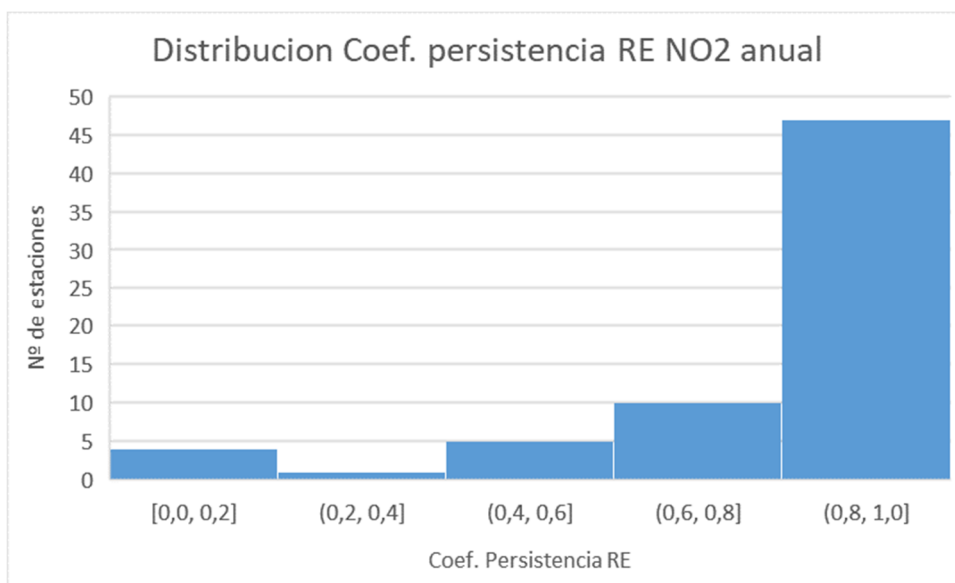


Figura 95. Histograma de distribución de índices de persistencia de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el NO₂ anual

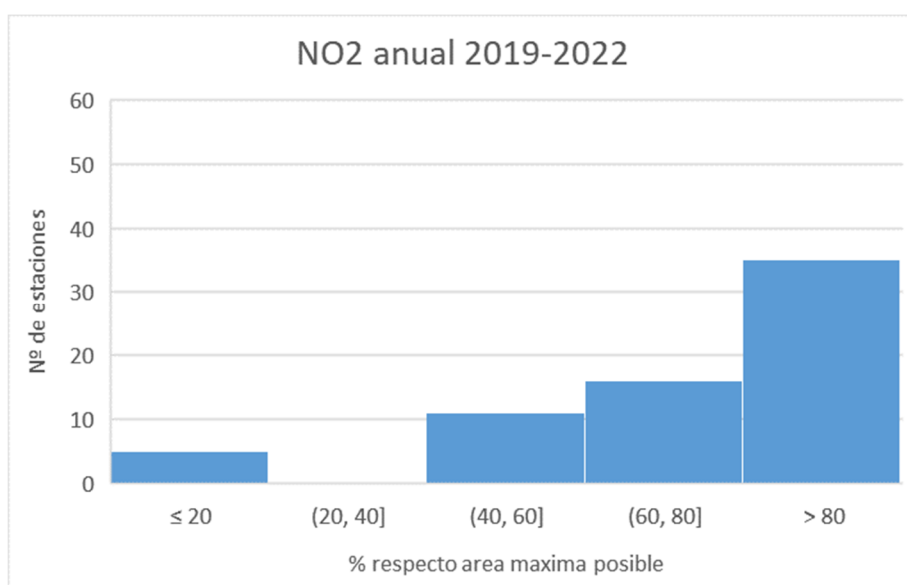


Figura 96. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el NO₂ anual

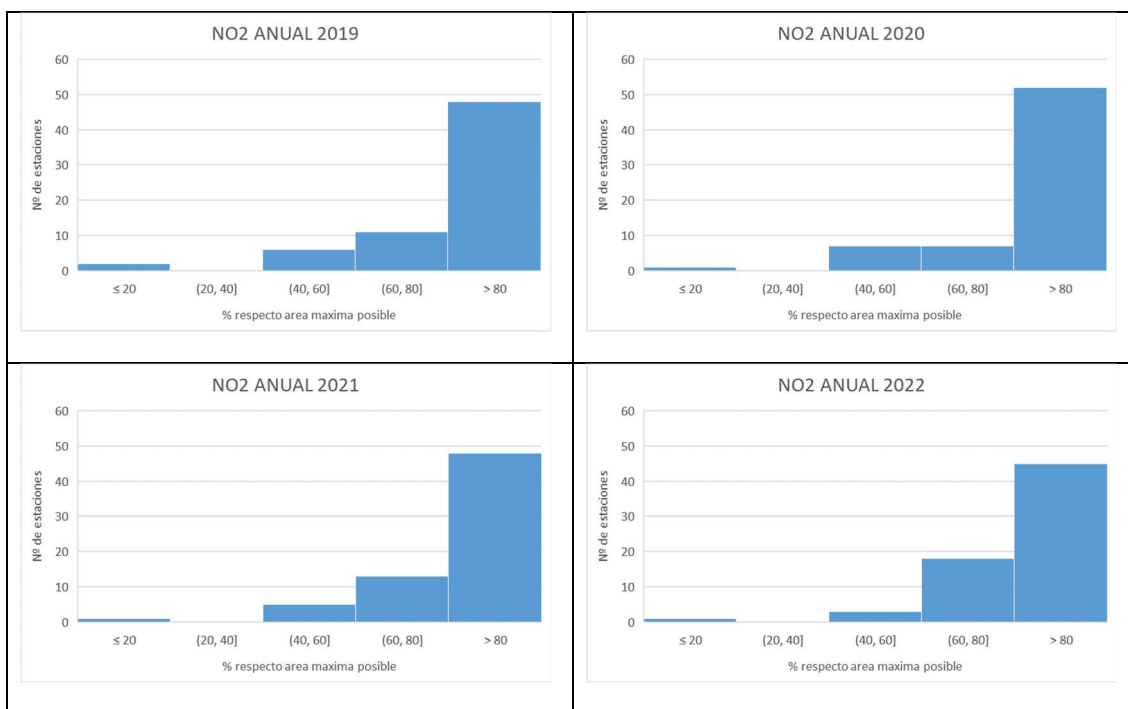


Figura 97. Histogramas de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual para los años 2019, 2020, 2021 y 2022 para el NO₂ anual considerando todas las estaciones operativas en esos años.

Para **PM_{2.5} anual**, la persistencia plurianual de las áreas de representatividad es baja con el 62% de las estaciones con $P < 0.4$ (Figura 98), no hay ningún caso de $P > 0.8$. También los tamaños de las áreas de representatividad plurianual son pequeños (Figura 99): 55% de estaciones tienen áreas de representatividad con tamaño relativo inferior al 20% y un 86% tienen tamaños relativos inferiores al 40%. Además, esta distribución difiere mucho de las distribuciones de tamaños relativos de cada año, incluso hay cambios muy notables de un año a otro (Figura 100). Esto es consistente con el bajo valor de persistencia P en la mayoría de los casos mostrando una alta variabilidad interanual en las áreas de representatividad que ya mostramos en secciones anteriores. Parece que las áreas de representatividad son algo mayores en 2021 y 2022, mientras que en 2019 hay más casos de áreas pequeñas. En 2020, apenas hay casos de tamaños $> 80\%$ o $< 20\%$.

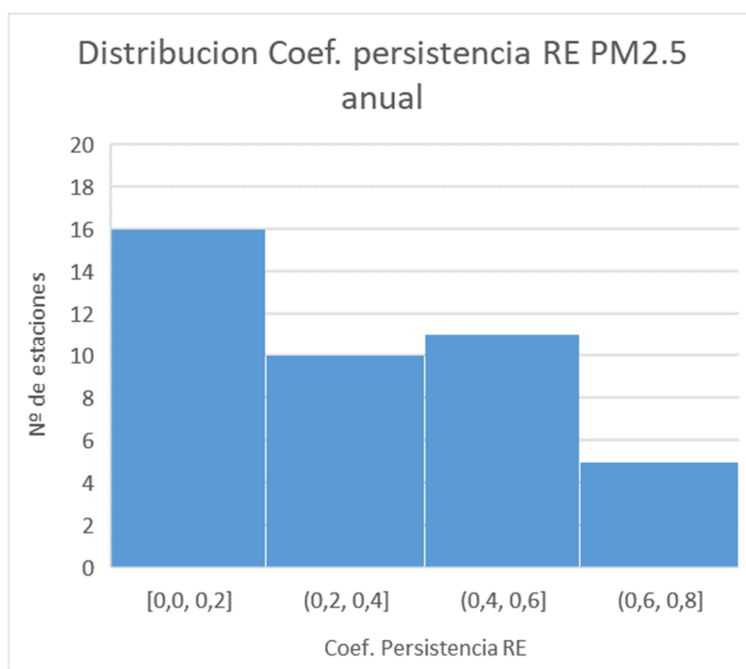


Figura 98. Histograma de distribución de índices de persistencia de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el PM2.5 anual

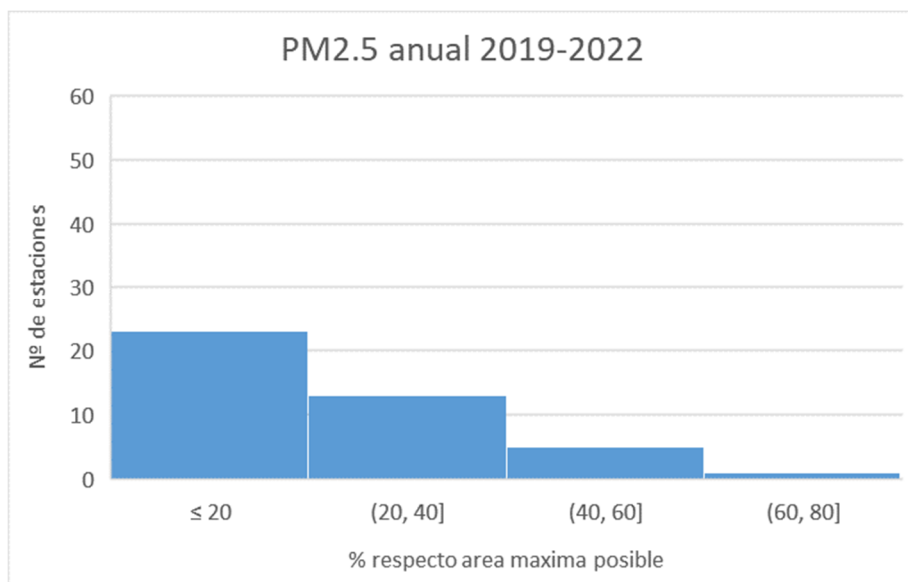


Figura 99. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el PM2.5 anual



Figura 100. Histogramas de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual para los años 2019, 2020, 2021 y 2022 para el PM2.5 anual considerando todas las estaciones operativas en esos años.

En el caso del **PM10 anual**, tenemos unos índices de persistencia mayores que para el PM2.5 anual, pero claramente inferiores al SO₂ y NO₂ anuales. El 63% de las estaciones tienen un P entre 0.2 y 0.6. Tampoco hay casos de P > 0.8. (Figura 101). En cuanto a los tamaños de áreas plurianuales, no hay tamaños relativos grandes (> 80%) y el 97% de las áreas son de tamaño relativo inferior al 60% del máximo posible (Figura 102), es decir, dominan los tamaños medianos y pequeños. Al igual que para el PM2.5, la distribución de tamaños plurianual difiere mucho de las distribuciones de tamaños relativos de cada año, con cambios muy significativos de un año a otro (Figura 103). Está en correspondencia con los índices de persistencia medios y bajos encontrados. Se aprecian diferencias notables entre 2019-20 y 2021-22. En estos dos últimos años, aumentan mucho los casos de tamaños relativos entre el 60 y 80% del máximo posible.

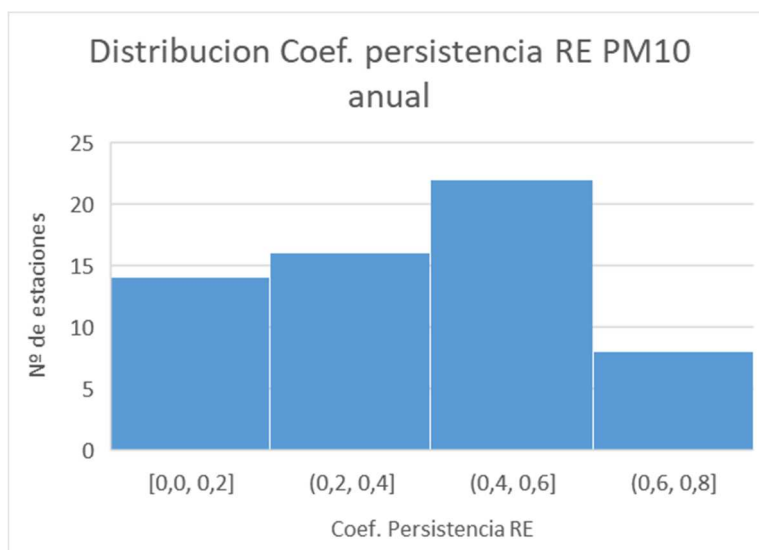


Figura 101. Histograma de distribución de índices de persistencia de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el PM10 anual

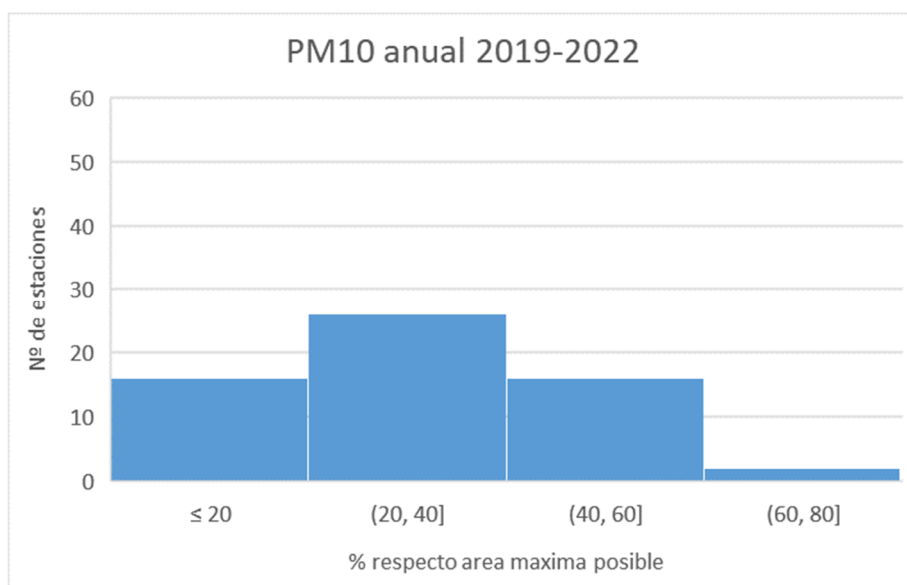


Figura 102. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el PM10 anual

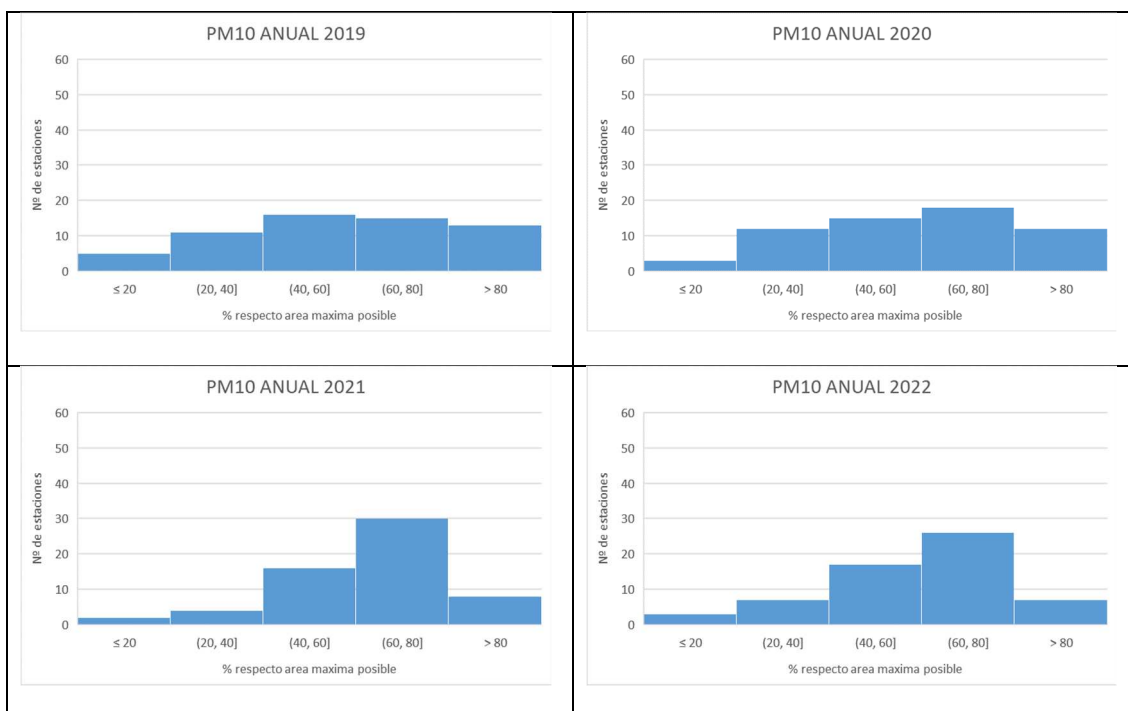


Figura 103. Histogramas de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual para los años 2019, 2020, 2021 y 2022 para el PM10 anual considerando todas las estaciones operativas en esos años.

Analizando la persistencia y tamaños de áreas de representatividad plurianual para el **O₃ octohorario**, nos damos cuenta que la distribución de los índices de persistencia es bastante parecida a las del PM2.5. Es decir, los valores de P son bajos siendo menores de 0,6 en el 93% de los casos y menores de 0,2 en el 37% (Figura 104). Los tamaños de dichas áreas son también medianos y pequeños (94% de los casos con tamaños relativos inferiores al 60% del máximo posible y el 42% con tamaños inferiores al 20%) (Figura 105). Esta distribución de tamaños de áreas plurianuales es muy diferente de las distribuciones de tamaños de las áreas de cada año (Figura 106). Esto coincide otra vez con los bajos valores de los índices de persistencia. Los años 2020 y 2021 son bastante parecidos con dominancia de áreas grandes (tamaños relativos > 80%), pero en 2022 y sobre todo en 2019, la distribución es muy diferente dominando los tamaños relativos intermedios (entre 40 y 80%).

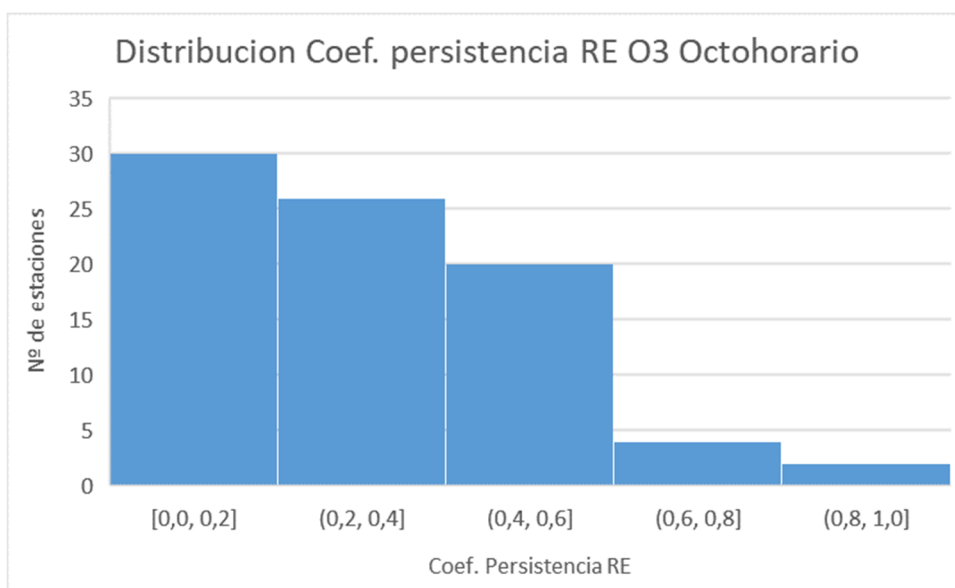


Figura 104. Histograma de distribución de coeficientes de persistencia de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el O₃ octohorario

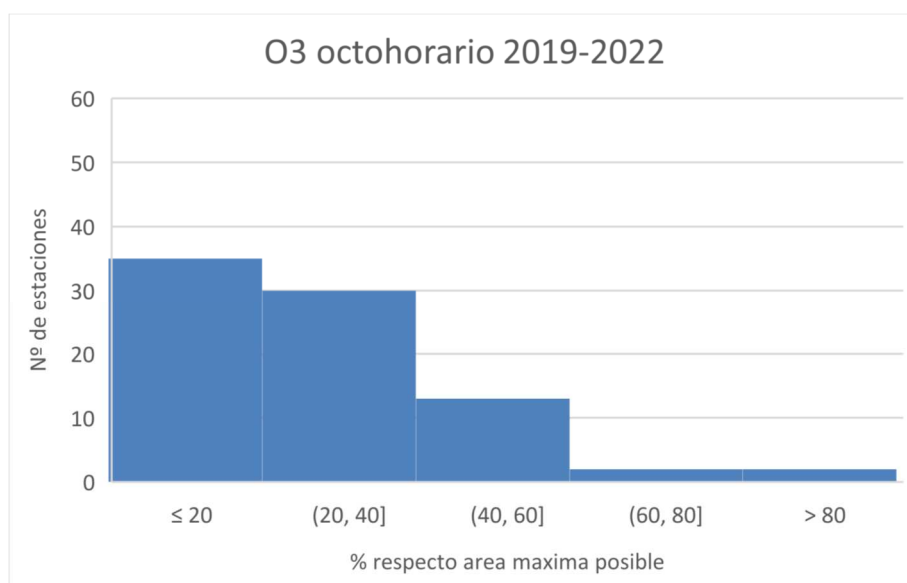


Figura 105. Histograma de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual 2019-22 para el O₃ octohorario

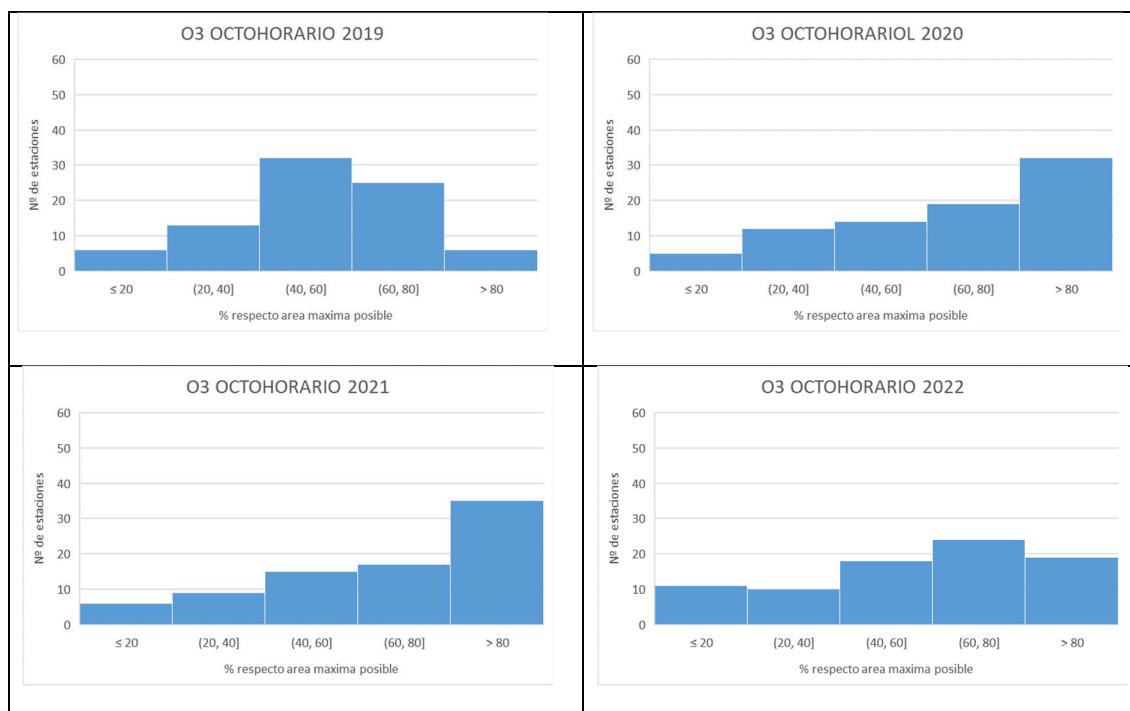


Figura 106. Histogramas de distribución de tamaños relativos de áreas de representatividad plurianual para los años 2019, 2020, 2021 y 2022 para el O₃ octohorario considerando todas las estaciones operativas en esos años.

En resumen, podemos decir que hay dos grupos claros de contaminantes según la persistencia de las áreas de representatividad de un año a otro y sus tamaños:

1) **NO₂ y SO₂**, generalmente con grandes áreas de representatividad espacial, buena cobertura total todos los años y alta persistencia interanual (baja variabilidad interanual)

2) **Ozono, PM_{2.5} y PM₁₀**, generalmente con áreas de representatividad de tamaño medio o pequeño, peor cobertura espacial y persistencias medias y bajas (alta variabilidad interanual). Aunque puede matizarse que el PM₁₀ tiene áreas de representatividad y persistencias algo mayores que los otros dos contaminantes de este grupo.

El primer grupo son contaminantes de tipo primario directamente emitidos por sus fuentes, mientras que los segundos son contaminantes con una alta contribución de formación por reacciones químicas (contaminantes secundarios). El ozono es completamente secundario, el PM_{2.5} tiene un porcentaje alto de contribución de aerosoles secundarios y el PM₁₀ también,

aunque quizá menor que el PM2.5. En el caso de los contaminantes secundarios, además de las variables meteorológicas que, al igual que los contaminantes primarios, determinan su transporte (y el de sus precursores), intervienen otras variables meteorológicas en su formación y transformaciones químicas en la atmósfera. Las condiciones meteorológicas cambiantes de un año a otro pueden por tanto dar lugar a una mayor variabilidad en la distribución espacial de su concentración. Esto afectaría a las estimaciones de las áreas de representatividad espacial de las estaciones.

9. ANALISIS DE REDUNDANCIA DE ESTACIONES DE CALIDAD DEL AIRE

Con “redundancia” nos referimos a que dos o más estaciones sean representativas de una misma porción de territorio. Para estimar cuán redundantes son dos estaciones, se ha propuesto un factor. Se llama factor Q y proporciona el porcentaje de redundancia entre dos estaciones. Se puede escribir como:

$$Q = I_{ab} / (N_a + N_b - I_{ab}) \quad (2)$$

donde I_{ab} es el número de celdas en común entre el área de representatividad de dos estaciones (a, b), N_a es el número de celdas del área de representatividad de la estación a , y N_b es el número de celdas del área de representatividad de la estación b .

El factor Q es la relación entre el área de representatividad común entre dos estaciones y el área de representatividad total de las mismas estaciones. Q varía entre 0 y 1, 0 significa que no hay área común, por lo que no hay redundancia entre esas estaciones, mientras que 1 significa que las áreas de representatividad de las dos estaciones son totalmente coincidentes y, por tanto, las estaciones serían redundantes plenamente.

Se realizaron dos análisis separados de redundancia de estaciones para cada contaminante considerando las áreas de representatividad espacial plurianuales (2019-22) y las anuales de 2022. Nos hemos fijado en los casos de alta redundancia ($Q > 0.8$).

Hay que resaltar que esta redundancia debe interpretarse a efectos de la evaluación anual de la calidad del aire. Es decir, se dice que dos estaciones son redundantes porque tienen una representatividad espacial similar pero solo a efectos de la superación o no de valores límite, objetivo o de umbrales de evaluación, sin importar si hay coincidencia o no en el tiempo, ya que bajo esta premisa se han calculado las áreas de representatividades espaciales. La idea

es que para informar o no de superación de valores límite/objetivo (en este caso, anuales para NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} y octohorario para el O₃) necesitamos informar del número de superaciones totales y, con esta metodología, las estaciones redundantes entre sí superan o no los valores límite, objetivo o umbrales en la misma cantidad de veces. Es decir, si dos estaciones son redundantes entre sí, bastaría con informar de la calidad del aire de una de ellas.

Con este estudio, no pretendemos que haya que quitar estaciones ya que no se trata de una redundancia estricta. Ésta exigiría que, además, las secuencias temporales de las concentraciones registrada en las estaciones estuvieran altamente correlacionadas. Esto no es tan relevante a efectos de la evaluación anual de la calidad del aire (el caso que nos interesa aquí), pero sí a efectos de investigación de la fenomenología y los mecanismos/procesos implicados o de control en tiempo real de la contaminación. Por eso, es importante mantener las estaciones, aunque a efectos de la evaluación de la calidad del aire puedan resultar redundantes al tener las mismas superaciones de valores límite/objetivo.

Tabla 3. N^o de estaciones con $Q > 0.8$ (alta redundancia) para cada contaminante considerando la representatividad espacial de cada estación para 2019-22. Se indica el número de estaciones (columna izquierda) con las que tiene redundancia significativa.

N ^o Q>0.8	SO2 ANUAL	NO2 ANUAL	O3 OCTOHORARIO	PM2.5 ANUAL	PM10 ANUAL
0	42	45	42	42	54
1	6	18	14	0	1
2	4	4	13	0	1
3	0	0	6	0	2
4	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	1
6	0	0	7	0	0
TOTAL Q>0.8	10	22	40	0	6
PORCENTAJE Q>0.8	19,2	32,8	48,8	0,0	10,0
TOTAL	52	67	82	42	60

En la tabla 3, se muestra la cantidad de casos de estaciones con $Q < 0.8$ y con cuántas estaciones tiene esa alta redundancia, considerando las áreas de representatividad plurianual para el periodo 2019-22. Para el PM_{2.5}, no se aprecia redundancia importante entre estaciones. Para el PM₁₀, hay pocos casos redundantes ya que hay solo 6 casos (10%) de redundancia entre estaciones (1 caso con una estación, 1 con 2, 2 con 3, 1 con 4 y 1 con 5). El SO₂ presenta más casos de redundancia al tener 10 casos (casi un 20%) concentrados en 6 estaciones con otra estación y 4 con 2. El NO₂ tiene muchos más casos de redundancia (22, más del 30%) con 18 estaciones que son redundantes con otra estación y 4 con 2. El ozono es el contaminante para el que se han encontrado más estaciones redundantes, 40 (casi el 50%), 14 de ellas redundantes con una estación, 13 con 2, 6 con 3 y 7 con 6. Hay que recordar que esta redundancia es a efectos de superación o no del valor objetivo sin considerar la correlación temporal.

En las tablas 4 a 7 puede verse las matrices de redundancia mutua entre estaciones para cada contaminante.

Tabla 4. Redundancia mutua ($Q > 0.8$) de estaciones para el NO_2 anual en el periodo 2019-22

	A L C U D I A	C A N _ L L O M	S A _ P O B L A	B K - B E R G A	M O R E L L A	Z O R I T A	R O D I S	B U S C A S	D O Ñ A N A	E L _ A R E N O	A Z - B E L L V	E L S _ T O R M	O R U S C O	S A N _ M A R T	V I L L A _ D E	V I L L A _ R E J	C T C C - F U N	C T C C - T U D	R 4 V A N D E L	S - A L B U F E	I - A m e t i l	M O N A G R E G	
ALCUDIA_	■																						
CAN_LLOM	■	■																					
SA_POBLA			■																				
BK-BERGA				■																			
MORELLA					■																		
ZORITA						■																	
RODIS							■																
BUSCAS								■															
DOÑANA									■														
EL_ARENO										■													
AZ-BELLV											■												
ELS_TORM												■											
ORUSCO													■										
SAN_MART														■									
VILLA_DE															■								
VILLAREJ																■							
CTCC-FUN																	■						
CTCC-TUD																		■					
R4VANDEL																			■				
S-ALBUFE																				■			
I-Ametil																					■		
MONAGREG																						■	

Tabla 5. Redundancia mutua ($Q > 0.8$) de estaciones para el SO₂ anual en el periodo 2019-22

	A L C U D I A _ M	C A N _ L L O M	S A _ P O B L A	C I R A T	M O R E L L A	Z O R I T A	R O D I S	B U S C A S	A L G A R _ P A	M O N A G R E G
ALCUDIA_										
CAN_LLOM										
SA_POBLA										
CIRAT										
MORELLA										
ZORITA										
RODIS										
BUSCAS										
ALGAR_PA										
MONAGREG										

Tabla 6. Redundancia mutua ($Q > 0.8$) de estaciones para el PM10 anual en el periodo 2019-22

	A L C U D I A _ M	M A H O N	C A N _ L L O M	S A _ P O B L A	H O S P I T A L	S A L B U F E R
ALCUDIA_						
MAHON						
CAN_LLOM						
SA_POBLA						
HOSPITAL						
SALBUFER						

Si nos fijamos en los resultados obtenidos para sólo el año 2022, vemos que los casos de redundancia alta ($Q < 0.8$) suelen ser más frecuentes que para las áreas plurianuales 2019-22, algo que es de esperar ya que hemos podido comprobar que las áreas de representatividad espacial plurianual son más pequeñas que las de los años individuales. Así vemos en la Tabla 8 que en el caso del PM2.5 sí que hay casos de redundancia significativa (3 casos, 9%) siendo 2 estaciones con una estación y 1 con 2. En el caso del PM10, tenemos 9 casos (casi 18% frente al 10% que resulto para 2019-22) con 6 casos redundantes con una estación y 3 con 2. Para el SO₂, las estaciones redundantes suben a 13 (31.7 % frente al 19% de 2019-22) con 10 estaciones redundantes con una estación y 3 con 2. En el caso del NO₂, tenemos menos casos de estaciones redundantes (28% frente al 32% en 2019-22) con 11 casos con 1, 1 con 2, 3 con 3 y 1 con 4. Esta reducción de redundancia se debe a que en 2022 se ha analizado las 57 estaciones que proporcionaban dato ese año, mientras que para el periodo 2019-22 se consideraron todas que estuvieron activas en alguno de esos años (67). Para el ozono, la redundancia sube mucho hasta un 64.4% de las estaciones (24 con 1, 9 con 3, 7 con 3, 1 con 4, 3 con 5 y 3 con 6).

En las tablas 9 a 13, pueden verse las matrices de redundancia mutua entre estaciones para cada contaminante.

Tabla 8. Nº de estaciones con $Q > 0.8$ (alta redundancia) para cada contaminante considerando la representatividad espacial de cada estación para 2022. Se indica el número de estaciones (columna izquierda) con las que tiene redundancia significativa.

Nº Q>0.8	SO2 ANUAL	NO2 ANUAL	O3 OCTOHORARIO	PM2.5 ANUAL	PM10 ANUAL
0	28	41	26	30	42
1	10	11	24	2	6
2	3	1	9	1	3
3	0	3	7	0	0
4	0	1	1	0	0
5	0	0	3	0	0
6	0	0	3	0	0
TOTAL Q>0.8	13	16	47	3	9
PORCENTAJE Q>0.8	31,7	28,1	64,4	9,1	17,6
TOTAL	41	57	73	33	51

Tabla 9. Redundancia mutua ($Q > 0.8$) de estaciones para el NO_2 anual en el periodo 2022

	S - A L B U F E	A L C U D I A _	U I B - P A R C	C A N _ L L O M	S A _ P O B L A	C I R A T	Z O R I T A	D O Ñ A N A	E L _ A R E N O	J u n e d a _ P	S A N _ M A R T	V I L L A _ D E	I - A m e t l l o	V a n d e l l o	M O N A G R E G	A L G A R _ D E
S-ALBUFE																
ALCUDIA_																
UIB-PARC																
CAN_LLOM																
SA_POBLA																
CIRAT																
ZORITA																
DOÑANA																
EL ARENO																
Juneda_P																
SAN_MART																
VILLA_DE																
I-Ametll																
Vandello																
MONAGREG																
ALGAR_DE																

Tabla 10. Redundancia mutua ($Q > 0.8$) de estaciones para el SO_2 anual en el periodo 2022

	1	3	4	6	7	8	10	12	14	19	20	35	37	
	V A L D E R E J	A L C U D I A	H O S P I T A L	U I B - P A R C	C A N - L L O M	S A - P O B L A	M E D I N A _ D			Z O R I T A	M A T A L A S C	D O N A N A	M O N A G R E G	A L G A R _ D E
1 VALDEREJ														
3 ALCUDIA_														
4 HOSPITAL														
6 UIB-PARC														
7 CAN_LLOM														
8 SA_POBLA														
10 MEDINA_D														
12 CIRAT														
14 ZORITA														
19 MATALASC														
20 DOnANA														
35 MONAGREG														
37 ALGAR_DE														

Tabla 11. Redundancia mutua ($Q > 0.8$) de estaciones para el PM10 anual en el periodo 2022

	S A L B U F E R	A L C U D I A	S A _ P O B L A	J u n e d a _ P	P o n t s _ P o	E L _ A T A Z A	G U A D A L I X	C A U D E T E	V I L L A R _ D
SALBUFER									
ALCUDIA_									
SA_POBLA									
Juneda_P									
Ponts_Po									
EL_ATAZA									
GUADALIX									
CAUDETE_									
VILLAR_D									

Tabla 12. Redundancia mutua ($Q > 0.8$) de estaciones para el PM2.5 anual en el periodo 2022

	6	7	8
A i g u a f r e		S a n t a _ M a r i a	T o n a _ z o n
6 Aiguafre			
7 Santa_Ma			
8 Tona_zon			

10. METODOLOGIAS PARA EVALUAR REPRESENTATIVIDAD DE ESTACIONES URBANAS

Para calcular la representatividad espacial (RE) de estaciones urbanas se precisan otro tipo de modelos a los utilizados para las estaciones rurales, ya que en las calles hay mayor complejidad de circulaciones de aire debido a los edificios y otros obstáculos, que afecta a la dispersión de contaminantes. Además, las emisiones (tráfico, etc) de contaminantes están heterogéneamente distribuidas. Esto obliga a que se utilicen modelos a microescala que simulen mejor esos efectos. Hay varios tipos de modelos, en orden de complejidad:

- Gaussianos urbanos. Son modelos muy simplificados con ciertas parametrizaciones para considerar efectos de edificios, etc y con poco coste computacional, aunque con escasa resolución espacial.
- Lagrangianos. Simulan los contaminantes como una nube de partículas sobre un campo de vientos generado de alta resolución. Tienen un coste computacional generalmente medio.
- CFD. Modelos basados en las ecuaciones de la mecánica de fluidos. Son muy precisos y proporcionan resultados con mucha resolución espacial, pero con un mayor coste computacional.
- Inteligencia artificial. Son modelos que usan técnicas de Deep Learning que son entrenados con simulaciones realizadas con modelos CFD bajo diferentes configuraciones urbanas. Esto les permite hacer estimaciones de la distribución espacial de la concentración de contaminantes en zonas urbanas con una resolución similar al de un modelo CFD, pero con menor coste computacional.

El uso de modelos de microescala urbana es especialmente necesario para poder evaluar la calidad del aire en “hot spots” urbanos y determinar áreas de representatividad fiables. Con esos modelos podremos calcular medias o percentiles de concentraciones de contaminantes con buena resolución espacial (del orden de metros). La cuestión es qué tipo de modelos es más adecuado.

En el marco del grupo de trabajo WG4 (Microscale urban modelling) de FAIRMODE (Foro de Modelización de la Calidad del Aire en Europa), el año pasado se hizo una intercomparación de un amplio grupo de modelos (de 9 grupos europeos incluyendo a CIEMAT, que coordina el ejercicio) cubriendo los tipos antes indicados para con las metodologías adecuadas poder estimar concentraciones de NO₂ en un distrito de la ciudad de Amberes en Bélgica. Los resultados fueron comparados con datos medidos en dos estaciones de calidad del aire (una urbana de fondo y otra de tráfico) y datos de una campaña de un mes de medida con captadores pasivos (más de 70 distribuidos por el distrito) en 2016.

En cuanto a las concentraciones medias mensuales, se comprobó que los modelos CFD (con metodología basada en escenarios simulados previamente) y Lagrangianos predicen la concentración media mensual notablemente mejor que los Gaussianos, y, además, simulan mejor la distribución espacial de concentraciones de NO₂, ya que los Gaussianos proporcionan generalmente mapas de concentración muy suavizados y de poca resolución. Los modelos basados en Inteligencia Artificial dieron resultados razonablemente buenos, aunque no llegaban a la calidad de los CFD.

Este año se ha trabajado en intercomparar las estimaciones de representatividad espacial para el NO₂ anual para las dos estaciones (una de tráfico y otra de fondo urbano) con los resultados de concentración media de anual de NO₂ obtenidos con cada modelo considerando la representatividad espacial de una estación como el área dentro de la cual la concentración de NO₂ difiere del valor en el punto de la estación en menos de un margen de tolerancia. Se utilizaron los dos márgenes de tolerancia que se están analizando en FAIRMODE (10 y 20%). Se utilizaron 12 resultados de modelos CFD, 1 de Lagrangiano, 2 de Inteligencia Artificial y 5 Gaussianos. Las resoluciones espaciales han variado desde 1 m a 20 m.

En la Figura 107, se muestran los resultados obtenidos de representatividad espacial para ambas estaciones con ambos márgenes de tolerancia. Se trata de

una superposición de las áreas estimadas por cada modelo. Cuanto más oscuro es un pixel, más modelos lo incluyen dentro del área de representatividad. Se puede comprobar que las áreas de representatividad estimadas para la estación de fondo son mayores que las de la estación de tráfico. Esa diferencia es más notable cuando se usa una tolerancia del 10%. Cuando subimos la tolerancia al 20%, los tamaños crecen, pero más en el caso de la estación de tráfico. Llama mucho la atención que en el caso de la estación de tráfico solo una de las áreas de representatividad alcanza al centro de la avenida que cruza el dominio de Oeste a Este. Es la de un modelo Gaussiano que trabaja a una resolución muy pobre, de tal forma que proporciona muy poca variabilidad espacial y dando lugar a áreas de representatividad que cubren todo el dominio prácticamente. Este modelo es el que peor se ajustaba a los datos observados en la campaña de pasivos realizada, infraestimando en zonas de alta concentración. El resto, que presentaban ajustes razonables, a lo observado dan una variabilidad espacial mucho mayor con altas concentraciones en las calles, pero en estos casos sus áreas de representatividad excluyen los tramos de calle de muy alta contaminación.

Si analizamos los resultados por tipos de modelos (Figura 108), los modelos Gaussiano tienden a estimar áreas más extensas ya que simulan peor la variabilidad espacial de concentración dentro de las calles. Los otros tipos de modelos son bastante coincidentes (salvo excepciones individuales), proporcionando áreas de representatividad espacial similares y con alta resolución. Estos modelos estiman áreas claramente más extensas para la estación de fondo urbano que para la de tráfico. Además, el efecto de aumentar el margen de tolerancia es muy notable, especialmente en los modelos de inteligencia artificial en la estación de tráfico.

Se sigue trabajando en el análisis en profundidad de estos resultados en el marco del WG4 de FAIRMODE.

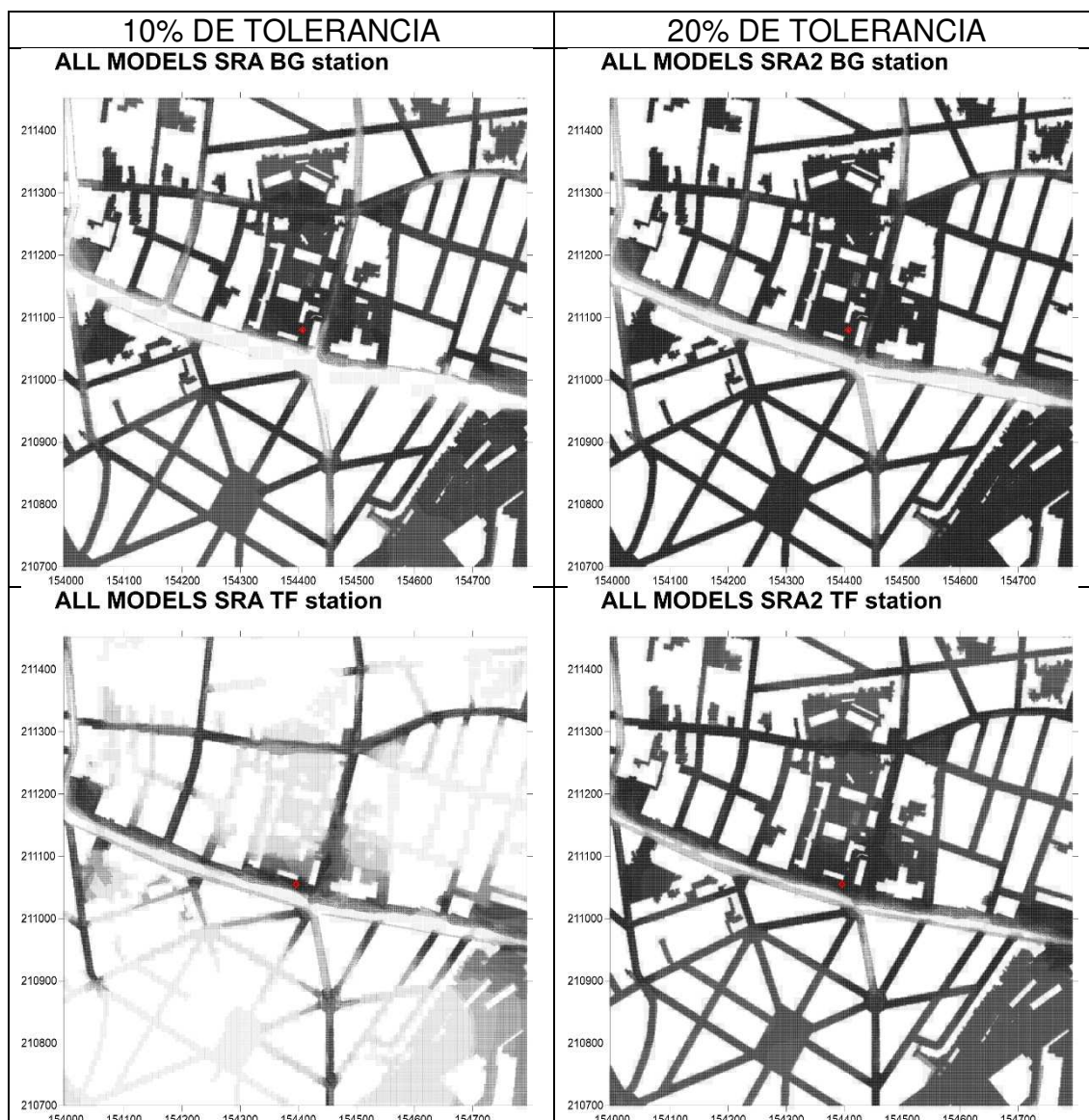


Figura 107. Superposición del conjunto de estimaciones de área de representatividad espacial de la estación de fondo urbano (arriba) y de tráfico (abajo) obtenidas para todos los modelos utilizados asumiendo márgenes de tolerancia del 10% (izquierda) y 20% (derecha). Cuanto más oscura es un pixel más modelos lo incluyen dentro del área de representatividad. Se considera sólo el área no cubierta por edificios. El punto rojo indica la localización de la estación en cuestión.

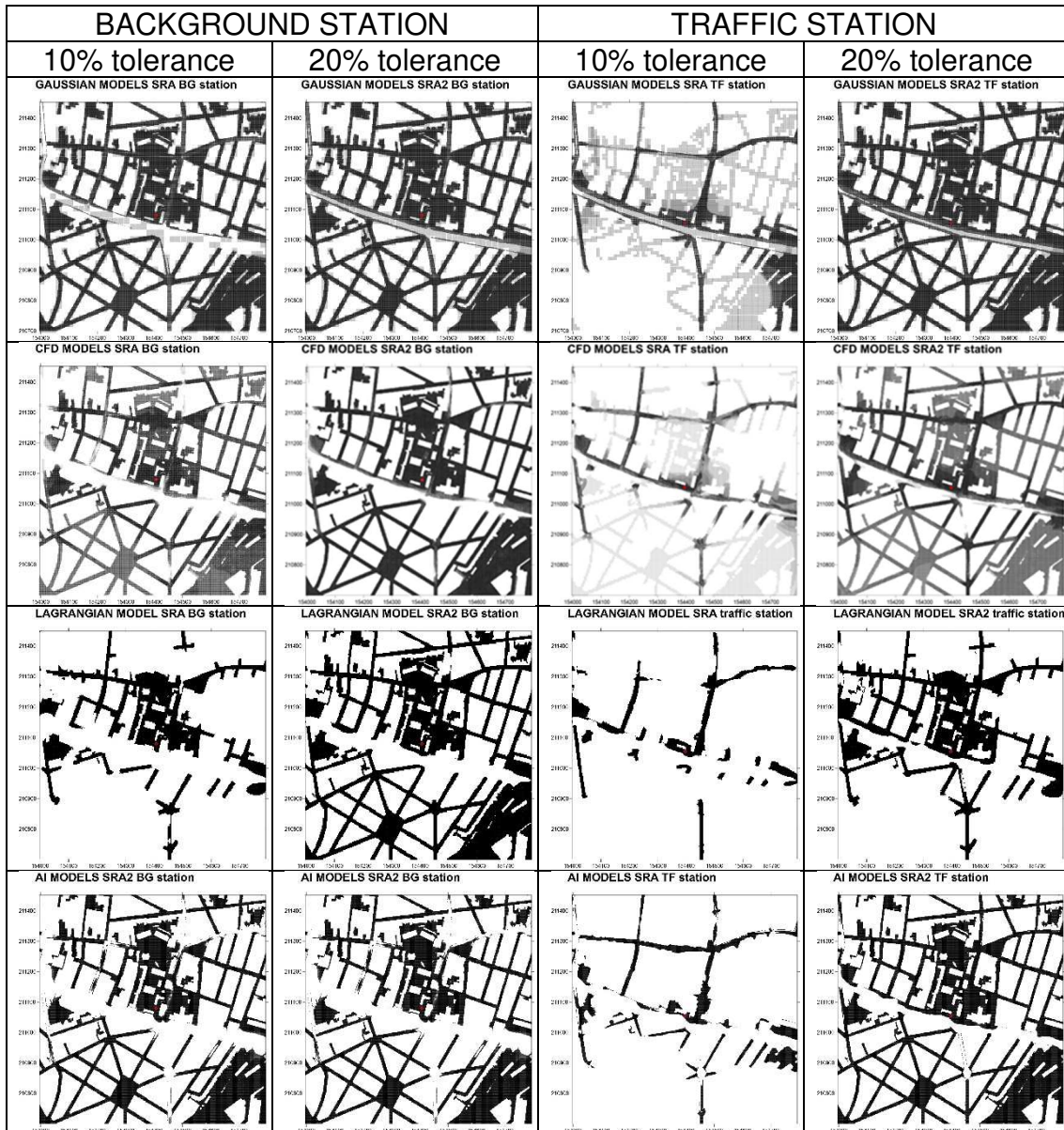


Figura 108. Superposición de estimaciones de área de representatividad espacial de la estación de fondo urbano y de tráfico agrupados por los distintos tipos de modelos utilizados (5 Gaussianos, 12 CFD, 1 Lagrangiano y 2 AI-Inteligencia Artificial) y asumiendo márgenes de tolerancia del 10% (izquierda) y 20% (derecha). Cuanto más oscura es un pixel más modelos lo incluyen dentro del área de representatividad. Se considera sólo el área no cubierta por edificios. El punto rojo indica la localización de la estación en cuestión.

11. CONCLUSIONES

Se ha calculado la **representatividad espacial de 2022 de las estaciones rurales de fondo** en la Península y Baleares para NO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂ para indicadores anuales, diarios, horarios y octohorarios (según sea el contaminante y los valores límite y objetivo fijados por la legislación), empleando los resultados de concentración de contaminantes en malla de 0.05°x0.05° procedentes de la evaluación anual de la calidad del aire, combinando la simulación anual con el modelo CHIMERE y las mediciones de estaciones. Los resultados han sido:

1. Para el **NO₂**, se obtuvieron áreas de representatividad muy extensas en media, mayores para el **NO₂ anual** (84% en media sobre el máximo tamaño posible) que para el **horario** (75%). Se encontraron muy pocos casos de áreas pequeñas.
2. Respecto al **ozono horario y octohorario** (el 26º valor mayor de concentración octohoraria), las áreas de representatividad son claramente menos extensas que para otros contaminantes como el NO₂ y el SO₂. El tamaño relativo medio se situó entre el 54% para el ozono horario y el 56% para el octohorario.
3. Para el **PM_{2.5} anual**, las áreas de representatividad son algo mayores (tamaño relativo medio del 62%) que las del ozono, pero bastante más pequeñas que para el NO₂ y el SO₂.
4. El **PM₁₀** las áreas de representatividad son de tamaños similares a las encontradas para el ozono o el PM_{2.5}, con tamaño relativo medio del 61% para el **PM₁₀ anual** y 53% para el **PM₁₀ diario**.
5. El **SO₂** tiene las mayores áreas de representatividad espacial con tamaños relativos medios superiores al 80% en los 3 indicadores **SO₂ anual, diario y horario**. Hay muy pocos casos con tamaños inferiores al 60%.
6. Los indicadores horarios para NO₂ y SO₂ suelen tener asociadas áreas de representatividad más pequeñas respecto a los anuales. También los

diarios en el caso del PM10. Para el ozono, las áreas asociadas al ozono horario son algo más pequeñas que las del ozono octohorario.

Se estimó **la cobertura total 2022** de las redes de medida para cada contaminante sumando las áreas de representatividad individuales. Se concluyó que:

- **Las coberturas totales para el NO₂ y el SO₂** abarcan casi la totalidad del territorio dejando sin cubrir principalmente grandes zonas urbanas principalmente y alguna industrial y de centrales térmicas. La cobertura es algo menor para los valores horarios respecto a los anuales y diarios (SO₂).
- **La cobertura espacial para el PM2.5, PM10 y O₃** es significativamente peor que para los contaminantes anteriores. En el caso del PM2.5 existe el hándicap de tener menos estaciones 33, mientras que el resto tiene más de 40, incluso el ozono más de 70. En estos 3 contaminantes hay bastantes zonas sin ser cubiertas.

Se estimó la **representatividad plurianual** de las estaciones de calidad aire rurales de fondo para el período **2019-22** para el NO₂, PM10, PM2.5 y SO₂ anuales y para el 26º valor mayor de concentración octohoraria de ozono. El área de representatividad plurianual de una estación para un contaminante es la intersección de las áreas individuales de cada año. Se consideraron todas las estaciones que algún año del período 2019-22 estuvieron operativas. Se obtuvieron los siguientes resultados más relevantes:

- Las áreas de representatividad plurianual 2019-22 resultaron de un tamaño y forma bastante similar a las anuales 2022 en los casos del **NO₂ y SO₂**.
- Para el **ozono octohorario, PM2.5 y PM10**, hay estaciones con un área de representatividad plurianual muy similar a la anual, pero en muchas otras hay diferencias significativas y a veces muy importantes.

Igualmente se calculó la **cobertura plurianual 2019-22** del conjunto de estaciones y para el NO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ y SO_2 anuales y para el 26º valor mayor de concentración octohoraria de ozono. Se concluyó que:

- Las coberturas plurianuales 2019-22 para el **NO_2** y **SO_2 anuales** son muy buenas (parecidas a las de 2022) cubriendo casi todo el territorio exceptuando zonas urbanas y alguna zona industrial o de centrales térmicas.
- Para **$\text{PM}_{2.5}$ anual**, **PM_{10} anual** y **ozono octohorario**, la cobertura presenta zonas no cubiertas de extensión considerable. La cobertura plurianual es claramente menor que la del año 2022.

Se ha analizado la **persistencia de las áreas de representatividad** para el período 2019-22. Se utilizó un índice de persistencia computado para cada estación y contaminante (los mismos utilizados para las representatividades y coberturas 2019-22). Se ha encontrado que hay dos grupos de contaminantes con un comportamiento muy diferenciado en cuanto a persistencia que concuerda con lo visto en los análisis de representatividades y coberturas 2022 y 2019-22. Estos grupos son:

1. Contaminantes de origen primario **NO_2** y **SO_2** , generalmente con grandes áreas de representatividad espacial y alta persistencia interanual (baja variabilidad interanual)
2. Contaminantes con una fuerte componente secundaria (formados a partir de primarios) como el **Ozono**, **$\text{PM}_{2.5}$** y **PM_{10}** , generalmente con áreas de representatividad de tamaño medio o pequeño, deficiente cobertura espacial y persistencias medias y bajas (alta variabilidad interanual). Estos contaminantes pueden ser más sensibles a las condiciones meteorológicas cambiantes de un año a otro, pues además de en el transporte, influyen en las reacciones químicas que sufren, dando lugar a mayor variabilidad en la distribución espacial de su concentración.

Además, se hizo un **análisis de redundancia de estaciones** de calidad del aire para 2022 y para 2019-22 para los contaminantes antes indicados y los

indicadores anuales y octohorario según correspondan. Se ha utilizado un factor de redundancia Q . Consideramos la redundancia al hecho de dos o más estaciones tengan un área de representatividad similar. Se considera que hay redundancia de dos estaciones cuando comparten un 80% de su área de representatividad. Los resultados obtenidos más importantes son:

- Generalmente, hay mayor redundancia en años individuales (2022) que en el periodo 2019-22, salvo para el **NO₂ anual**.
- Hay poca redundancia para **PM_{2.5} anual** (nula para 2019-22) y **PM₁₀ anual** (menos del 18%). Además, el PM_{2.5} es el que menos estaciones tiene.
- Hay redundancia bastante significativa para **NO₂ y SO₂ anual** (entre 19 y 32%).
- Redundancia alta (del orden del 50% o más) para el **O₃ octohorario** que también es el contaminante con más estaciones (más de 70).
- Se elaboraron las matrices mostrando con qué estaciones es redundante cada estación para cada contaminante y período.

Es importante subrayar que no se pretende que haya que quitar estaciones ya que no se trata de una redundancia estricta. Esta redundancia debe interpretarse a efectos de la evaluación anual de la calidad del aire para las que no se ha tenido en cuenta la correlación temporal en las concentraciones. La idea es que, si dos estaciones son redundantes entre sí, bastaría con informar de la calidad del aire de una de ellas.

Respecto a las **metodologías para estimación de representatividades espaciales de estaciones urbanas**, se muestra un avance de los resultados del ejercicio de intercomparación del WG4 de FAIRMODE para calcular las representatividades espaciales de dos estaciones de calidad del aire en un distrito de Amberes para el NO₂ anual. En este ejercicio se han usado modelos CFD, Gaussianos, Lagrangianos y de Inteligencia Artificial. Los resultados más relevantes han sido:

- Las áreas de representatividad estimadas para la estación de fondo son mayores que las de la estación de tráfico, especialmente si se usa una tolerancia del 10%.
- Cuando subimos la tolerancia al 20%, los tamaños crecen, pero más en el caso de la estación de tráfico.
- La carretera de la avenida principal queda fuera de las áreas de representatividad espacial estimadas por los modelos más fiables.
- Los modelos Gaussianos tienden a dar áreas más extensas ya que simulan peor la variabilidad espacial de concentración dentro de las calles.
- Los otros tipos de modelos son bastante coincidentes (salvo excepciones individuales) al proporcionar áreas de representatividad espacial similares y con alta resolución

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado principalmente con financiación del Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico en el marco del Protocolo de Actuación entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (DGCEA) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) en Materia de Contaminación Atmosférica y Contaminantes Orgánicos Persistentes (2021-2024). Además, dicha Dirección General ha proporcionado los datos medidos en las estaciones de calidad del aire españolas aquí estudiadas.

REFERENCIAS

- Blanchard, C.L., Carr, E.L., Collins, J.F., Smith, T.B., Lehrman, D.E., Michaels, H.M., (1999). Spatial representativeness and scales of transport during the 1995 integrated monitoring study in California's San Joaquin valley. *Atmospheric Environment* 33, 4775–4786.
- EC (European Commission), (2011). Establishing Guidelines for the Agreements on Setting up Common Measuring Stations for PM_{2.5} under Directive 2008/50/EC on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe, Brussels, 17 pages.
- Kracht O., Santiago J.L., Martin F., et al. (2017) Spatial representativeness of air quality monitoring sites: Outcomes of the FAIRMODE/AQUILA intercomparison exercise. EUR 28987 EN, European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability.
- Martín F.; L. Fileni; I. Palomino; M.G. Vivanco; J.L. Garrido (2014). Analysis of the spatial representativeness of rural background monitoring stations in Spain. *Atmospheric Pollution Research* 5, 779-788, doi: 10.5094/APR.2014.087.
- Martin F., J.L. Santiago, O. Kracht, L. García, M. Gerboles (2015): FAIRMODE Spatial representativeness feasibility study. Report number: EUR 27385 EN, European Commission Joint Research Centre Institute for Environment and Sustainability. doi: 10.2788/49487
- Martín F., M.G. Vivanco, M. Theobald, J.L. Garrido, V. Gil, A. Rodríguez-Sánchez (2021) Utilización de la modelización como apoyo en el diseño de Redes de Calidad del Aire. Protocolo de Actuación MITERD-CIEMAT (2021-2024). Subactividad 2.A: Análisis de la representatividad espacial de las redes de medida de la contaminación de fondo rural. Ref 3/2021.

- Martín F., M.G. Vivanco, M. Theobald, J.L. Garrido, V. Gil, C. Hernández y J.L. Santiago (2022) Utilización de la modelización como apoyo en el diseño de Redes de Calidad del Aire. Protocolo de Actuación MITERD-CIEMAT (2021-2024). Subactividad 2.A: Análisis de la representatividad espacial de las redes de medida de la contaminación de fondo rural. Ref 2/2022.
- Martín F., M.G. Vivanco, J.L. Santiago, M. Theobald, J.L. Garrido, V. Gil, A. Rodríguez-Sánchez (2022). Informe de participación de CIEMAT en grupos de trabajo y comités internacionales en 2022. Protocolo de Actuación MITERD-CIEMAT (2021-2024). Actividad 4: Asesoramiento a la DGCEA y participación en grupos de trabajo y comités internacionales sobre modelización de la calidad del aire
- Rivas E., Santiago JL, Lechón Y, Martín F, Ariño A, Pons JJ, Santamaría JM, (2019) CFD modelling of air quality in Pamplona City (Spain): Assessment, stations spatial representativeness and health impacts valuation. Science of the Total Environment 649, 1362-1380.
- Rodríguez-Sánchez A., M.R. Theobald, M.G. Vivanco, F. Martín (2021) Estimación de reducciones de emisiones en Europa durante la pandemia por COVID-19. Informe CIEMAT para Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD). Ref: 2/2021.
- Santiago JL, Martín F, Martilli A (2013) A computational fluid dynamic modelling approach to assess the representativeness of urban monitoring stations. Science of the Total Environment 454-455, 61-72.
- Santiago J.L. y F. Martín (2013) ESTUDIO DE REPRESENTATIVIDAD ESPACIAL DE ESTACIONES URBANAS DE CALIDAD DEL AIRE. Encomienda de Gestión 2010-2014 entre el Ministerio de Medio Ambiente y el CIEMAT para trabajos en materia de calidad del aire, energía y evaluación ambiental. Actuación 2: Aplicación de la modelización en la evaluación de la calidad del aire en España. Tarea 1.d. Estudio de representatividad espacial de estaciones urbanas de calidad del aire. Ref: 41/2013

- Vivanco M. G., J.L. Garrido, M. Theobald, V. Gil, F. Martín (2020). Evaluación de la calidad del aire en España utilizando modelización combinada con mediciones. Preevaluación año 2019. Informe CIEMAT para Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD). Ref: 15/2020.
- Vivanco M. G., J.L. Garrido, M. Theobald, V. Gil, A. Rodríguez-Sanchez, F. Martín (2021). Evaluación de la calidad del aire en España utilizando modelización combinada con mediciones. Preevaluación año 2020. Informe CIEMAT para Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD). Ref: 1/2021.
- Vivanco M. G., J.L. Garrido, M. Theobald, V. Gil, A. Rodríguez-Sanchez, F. Martín, C. Hernández (2022). Evaluación de la calidad del aire en España utilizando modelización combinada con mediciones. Preevaluación año 2021. Informe CIEMAT para Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD). Ref: 1/2022.
- Vivanco M. G., J.L. Garrido, M. Theobald, V. Gil, A. Rodríguez-Sanchez, C. Hernández, F. Martín (2022). Evaluación de la calidad del aire en España utilizando modelización combinada con mediciones. Preevaluación año 2022. Informe CIEMAT para Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (MITERD). Ref: 1/2022.