CONAMA 2026

Exposición de la población al NO_2 en la España peninsular a partir de información satelital

Edita: Fundación Conama

Año: 2026

Este documento está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional.

Personas autoras de la presente comunicación técnica

Autor Principal de la comunicación: Carlos Morillas López. Profesor Ayudante Doctor. Universidad Politécnica de Madrid.

Otros Autores: José Francisco Traub Gainsborg. Doctorando en Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Madrid.

Sara Martínez Delgado. Profesora Permanente Laboral. Universidad Politécnica de Madrid.

Sergio Álvarez Gallego. Profesor Titular. Universidad Politécnica de Madrid.

Muhammad Zaid Qamar. Doctorando en Medio Ambiente, Recursos y Desarrollo Sostenible. Università degli Studi di Napoli Parthenope.

Índice

1. Introducción 1

2. Materiales y métodos 3

2.1. Área de estudio y malla común 3

2.2. Datos 3

2.3. Modelo 4

2.4. Exposición e incertidumbre 5

3. Resultados 7

3.1. Precisión del modelo 7

3.2. Distribución espacial del NO_2 8

3.3. Exposición de la población según los valores de referencia 10

3.4. Exposición por grupos de población 11

3.5. Distribución territorial 13

4. Conclusiones 15

5. Bibliografía 16

1. Introducción

El dióxido de nitrógeno (NO_2) es uno de los contaminantes atmosféricos con mayor efecto sobre la salud en las ciudades europeas. Procede principalmente del tráfico rodado y de los procesos de combustión, y su concentración cambia mucho en distancias cortas y a lo largo del día, especialmente en entornos urbanos. El NO_2 tiene una vida media atmosférica de horas, que se reduce aún más durante periodos de cielo despejado (como durante el verano), ya que la luz solar favorece los procesos de fotólisis y conversión química a ozono (O_3). Por eso, su detección se produce muy cerca de las fuentes donde se ha emitido, y los picos de concentración tienen lugar en torno a las horas punta de transporte por carretera a lo largo del día.

La Directiva (UE) 2024/2881, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, ha endurecido el marco. A partir de 2030 el valor límite anual de exposición al NO_2 bajará de 40 a 20 µg/m^3, y se añade un valor límite diario de 50 µg/m^3 que no podrá superarse más de 18 días por año civil. Estos valores se revisarán periódicamente con el objetivo de aproximarse a los que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS), que en 2021 redujo su valor guía anual a 10 µg/m^3. La Directiva también refuerza el uso de la modelización para evaluar la calidad del aire en todo el territorio y no solo en los puntos de medida.

La evaluación actual se apoya en las redes de estaciones fijas. En la España peninsular hay unas 500 estaciones con medidas horarias de NO_2 de calidad contrastada. Su información es muy precisa en el punto donde están, pero no describe el espacio entre ellas. Los modelos químicos europeos de transporte cubren todo el territorio, pero a resoluciones de unos 10 km, que diluyen los picos urbanos. Además, la Ley 7/2021, de cambio climático y transición energética, obliga a los 152 municipios españoles de más de 50.000 habitantes (y a los territorios insulares) a adoptar planes de movilidad urbana sostenible (PMUS) que incluyan, entre otras medidas, zonas de bajas emisiones. Sin embargo, 99 de dichos municipios solo cuentan con una estación oficial de medida o con ninguna, por lo que el seguimiento de esas políticas puede ser limitado.

El instrumento TROPOMI, a bordo del satélite Sentinel-5P, operativo desde 2018 bajo el programa Copernicus, mide cada día la columna troposférica de NO_2 en todo el territorio con una resolución de unos 5,5 × 3,5 km. Esa columna no equivale a la concentración en superficie, que es la que respira la población, pero está estrechamente relacionada con ella. Como el NO_2 tiene una vida media corta, la mayor parte de la columna se concentra en las capas bajas de la atmósfera, cerca de las fuentes de emisión. Aun así, la relación entre ambas magnitudes no es directa: depende de la altura de la capa de mezcla, de la meteorología y de la hora de paso del satélite, en torno a las 13:30 hora solar local. Por ello, varios trabajos recientes han combinado TROPOMI con meteorología y otras capas de información mediante modelos de aprendizaje automático para estimar el NO_2 en superficie, tanto a escala europea (Shetty et al., 2024) como a escala regional en la Comunidad de Madrid (Morillas et al., 2026; Giosa et al., 2026).

Este trabajo busca estimar el NO_2 en superficie de forma diaria y anual en toda la España peninsular, con una resolución de 1 km, tomando datos entre 2020 y 2024 (último año con datos validados del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, MITECO), también donde no hay

estaciones de medida. Al cruzar estos mapas con la distribución de la población, se cuantifica cuántos habitantes residen en zonas que cumplen hoy los valores límite, pero quedarán por encima de los que establece la Directiva (UE) 2024/2881 a partir de 2030.

Para ello se combinan las medidas de las estaciones oficiales de calidad del aire con las observaciones diarias de TROPOMI, la meteorología del reanálisis ERA5 de Copernicus y capas de tráfico, emisiones, usos del suelo y población, mediante un modelo de aprendizaje automático (LightGBM). El modelo aprende, en los puntos con estación, la relación entre el NO_2 medido y lo que muestran esas fuentes en su celda de 1 km, y la extrapola al resto de celdas. Las cifras de exposición se acompañan de un intervalo de incertidumbre asociado a las limitaciones del modelo.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio y malla común

El área de estudio es la España peninsular. Todas las capas se llevan a una misma malla de 1 km en la proyección europea de igual área ETRS89-LAEA (EPSG:3035), de 1.010 × 887 celdas. Los mapas se predicen en las 498.608 celdas que tocan tierra o una sección censal del Instituto Nacional de Estadística (INE). Las capas de satélite, meteorología y emisiones se calculan también fuera de esa máscara (Portugal, Francia y el mar), para que las medias en un radio no se corten en la costa o en la frontera. El periodo abarca del 1 de enero de 2020 al 31 de diciembre de 2024 (1.827 días).

2.2. Datos

La variable que se quiere estimar procede de los datos horarios oficiales de calidad del aire del MITECO: 507 estaciones peninsulares, de las que 221 son de fondo, 160 industriales y 127 de tráfico. A partir de ellos se calcula la media diaria de 24 horas, con al menos 18 horas válidas, que es la magnitud a la que se refieren los valores límite.

Los predictores se agrupan en siete bloques (Cuadro 1). En total, el modelo usa 197 variables.

Cuadro 1. Fuentes de datos y variables que aportan al modelo.

Bloque	Fuente	Resolución	Variables
Satélite	Sentinel-5P/TROPOMI, NO_2 troposférico (qa > 0,75)	~5,5 × 3,5 km, diario	Columna a 1 km y suavizada a 5, 10 y 20 km; media de 30 días
Meteorología	ERA5-Land y ERA5 (Hersbach et al., 2020; Muñoz-Sabater et al., 2021)	~9 y ~31 km, horario	Viento, temperatura, humedad, radiación, precipitación y altura de la capa límite diarios
Vías y usos del suelo	OpenStreetMap; CORINE Land Cover 2018	Vectorial; 100 m	Longitud de vías por tipo en radios de 100 a 1.000 m; distancia a autovía; fracción de 11 usos del suelo
Tráfico y emisiones	CAMS-REG v8.1 (Kuenen et al., 2022) corregido con aforos del Ministerio de Transportes; inventario EMEP/CEIP	Por tramo; 0,1°	Vehículos-km y NOx de ligeros y pesados; emisiones de calefacción e industria
Relieve, vegetación y luces	MERIT DEM; MODIS NDVI; VIIRS	90 m; 1 km; anual	Altitud y posición en el valle; verdor mensual; luces nocturnas

Bloque	Fuente	Resolución	Variables
Población y actividad	Censo 2021 en malla de 1 km (INE), ajustado al padrón; movilidad del Ministerio de Transportes	1 km; diario por distrito	Población; índice diario de movilidad
Calendario	Festivos nacionales y autonómicos	Diario	Día de la semana, festivos y periodos de confinamiento de 2020

2.3. Modelo

La predicción se realiza con LightGBM, un algoritmo de aprendizaje automático de tipo gradient boosting. Construye de forma secuencial muchos árboles de decisión pequeños, y cada nuevo árbol se centra en corregir los errores que dejaron los anteriores. Tiene dos ventajas prácticas para este problema: admite valores ausentes, como los días nublados sin dato de TROPOMI, sin necesidad de rellenarlos, y admite variables categóricas, como el tipo de estación. Se entrena un modelo para cada objetivo, con 600 árboles, una tasa de aprendizaje de 0,05 y un máximo de 127 hojas por árbol.

El modelo se entrena con todas las estaciones, sean de fondo, de tráfico o industriales, e incluye el tipo de estación como una variable más. Así aprende de todas ellas cómo influyen en el NO_2 la meteorología, el satélite o el entorno, y por separado cuánto añade estar situada junto a una vía con mucho tráfico o cerca de una industria. Para generar los mapas hay que asignar un tipo a cada celda, y se les asigna a todas el tipo «fondo». Los mapas representan así el nivel general de cada zona, que es el que respira la mayor parte de la población, y no los valores más altos que se dan junto a vías concretas con mucho tráfico. Por ello, las cifras de exposición que se obtienen son conservadoras.

La fiabilidad de los mapas debe comprobarse con estaciones que el modelo no haya utilizado durante el entrenamiento. Además, como las estaciones próximas entre sí registran valores parecidos, una comprobación con estaciones vecinas a las de entrenamiento daría una precisión aparente mayor que la real. Por ello, el territorio peninsular se divide en bloques de 50 × 50 km, que se reparten en cinco grupos, y todas las estaciones de un mismo bloque se apartan o se incluyen siempre juntas. El procedimiento consta de los siguientes pasos:

1. Desde el inicio se reservó uno de los cinco grupos como conjunto de prueba independiente, que no se utilizó en ninguna decisión del desarrollo del modelo.

2. La selección de variables y la elección del algoritmo se realizaron con los cuatro grupos restantes. En cada ronda, el modelo se entrenó con tres grupos y se evaluó con el cuarto, rotando hasta que todos actuaron una vez como grupo de evaluación. Un cambio solo se aceptó cuando su mejora media superaba la variabilidad observada entre grupos, criterio establecido antes de analizar los resultados.

3. Una vez definido el modelo, se repitió el procedimiento con los cinco grupos. De este modo, cada estación dispone de una predicción obtenida con un modelo que no incluyó ninguna

estación de su bloque, y la comparación con los valores medidos proporciona el error esperable en zonas sin estaciones.

4. Se realizó una prueba complementaria, en la que se excluyeron estaciones individuales seleccionadas al azar en lugar de bloques completos. Esta prueba permite estimar el error en zonas próximas a la red de medida, donde reside buena parte de la población.

5. El modelo con el que se generan los mapas se entrenó finalmente con todas las estaciones y todos los días disponibles. Las pruebas anteriores tienen como único fin medir el error y fundamentar las decisiones metodológicas, y no modifican el modelo final.

2.4. Exposición e incertidumbre

La distribución de población procede de la malla de 1 km del Censo de Población y Viviendas 2021 (INE-Eurostat), que asigna a cada celda sus habitantes con desglose por grupos de edad. Como el censo describe un único año, la población de cada celda se ajusta para cada año del periodo 2020–2024 al padrón municipal; es decir, dentro de cada municipio todas las celdas se escalan en la misma proporción para que su suma coincida con la población empadronada ese año. Para los cálculos que requieren más detalle, como la asignación de la renta o el cruce con las secciones censales, la población se reparte en una malla de 100 m con ayuda de la capa de población GHS-POP de la Comisión Europea, que aporta información sobre las zonas edificadas del territorio. La renta media de los hogares procede del Atlas de Distribución de Renta de los Hogares del INE, publicado por sección censal, y se asigna a cada celda según la población que reside en cada sección. La localización de los equipamientos sensibles procede del Catálogo Nacional de Hospitales del Ministerio de Sanidad, en el caso de los hospitales, y de OpenStreetMap, en el caso de los centros educativos, las escuelas infantiles y las residencias de mayores; cada equipamiento se asigna a la celda de 1 km en la que se encuentra. Los datos de renta y de equipamientos se utilizan solo para analizar la exposición, no como variables del modelo de NO_2. Esto permite caracterizar la exposición de los grupos de población más vulnerables, como la infancia, las personas mayores o los hogares con menor renta.

La exposición se obtiene cruzando los mapas con la población de cada celda. Se resume de dos formas, tanto para el conjunto de la población como para cada uno de los grupos anteriores: como concentración media ponderada por población, es decir, la que respira el habitante medio, y como porcentaje de población por encima de cada umbral.

En el caso del límite diario, contar directamente en el mapa los días por encima de 50 µg/m^3 subestima las superaciones, porque el modelo tiende a suavizar los picos. Por ello se calculan los «días esperados»: a cada predicción diaria se le añade un error aleatorio con la distribución observada en la validación, y se promedia el número de días por encima de 50 µg/m^3 en el conjunto de simulaciones.

Las cifras de exposición que se presentan no proceden de un recuento directo sobre el mapa, sino de una simulación que incorpora el error del modelo medido en la validación. La comparación con estaciones de fondo no utilizadas en el entrenamiento muestra que el mapa tiende a situarse ligeramente por encima de los valores medidos, entre 0,5 y 0,9 µg/m^3 en la media anual según la distancia a la estación más cercana, y que, además de este sesgo, cada celda tiene un error aleatorio que aumenta con el nivel de NO_2. A partir de esta información se generan 500 versiones plausibles del mapa: en cada celda se corrige el sesgo que le corresponde y se añade un error aleatorio del tamaño observado, con una correlación espacial que disminuye con la distancia

(distancia característica de 66 km). En cada versión se calcula la población por encima de cada umbral. Cada cifra se expresa como una estimación central, que es la mediana de las 500 versiones, acompañada de un intervalo del 90 %, comprendido entre sus percentiles 5 y 95. La estimación central queda así corregida del sesgo del modelo, y el intervalo indica el margen en el que se encuentra el valor real con una probabilidad del 90 %. Los mapas que se presentan corresponden también a la estimación central, es decir, al mapa del modelo una vez corregido el sesgo. Como comprobación, el 91,6 % de los valores anuales medidos en las estaciones queda dentro de su intervalo del 90 %.

Por lo tanto, los resultados deben leerse como estimaciones del nivel de fondo en celdas de 1 km, acompañadas de su margen de incertidumbre, y no como valores exactos en un punto concreto: indican con qué probabilidad una zona y su población superan cada umbral, y tienden a quedarse cortos en las calles con mucho tráfico.

3. Resultados

3.1. Precisión del modelo

La precisión del modelo se ha medido en el grupo de bloques de prueba, formado por 97 estaciones situadas en bloques de 50 km que no intervinieron en el entrenamiento ni en ninguna decisión sobre el modelo. El Cuadro 2 recoge la raíz del error cuadrático medio (RMSE), el error absoluto medio (MAE), el sesgo y el coeficiente de determinación (R^2), tanto para los valores diarios como para las medias anuales.

Cuadro 2. Error del modelo en el grupo de bloques de prueba.

Valor evaluado	n	RMSE (µg/m³)	MAE (µg/m³)	Sesgo (µg/m³)	R^2
Valor diario	160.114	5,59	4,03	+0,95	0,67
Media anual	442	3,50	2,57	+0,94	0,73

n: estaciones-día (valor diario) o estaciones-año (media anual). Sesgo: valor predicho menos valor medido.

En zonas sin estación, el error típico de un día concreto es de unos 4 µg/m³ (MAE), y el de la media anual, que es la magnitud que se compara con los valores límite, de 2,6 µg/m³. El modelo explica el 67 % de la variabilidad de los valores diarios y el 73 % de la de las medias anuales (Figura 1). Las mayores diferencias se dan en las estaciones de tráfico más contaminadas, que el modelo tiende a subestimar, como cabe esperar con una resolución de 1 km. El sesgo del conjunto es positivo y pequeño, inferior a 1 µg/m³; es decir, el modelo tiende a situarse ligeramente por encima de lo medido. Este efecto se corrige en los mapas y en las cifras de exposición que se presentan a continuación, tal como se ha descrito en el apartado de métodos.

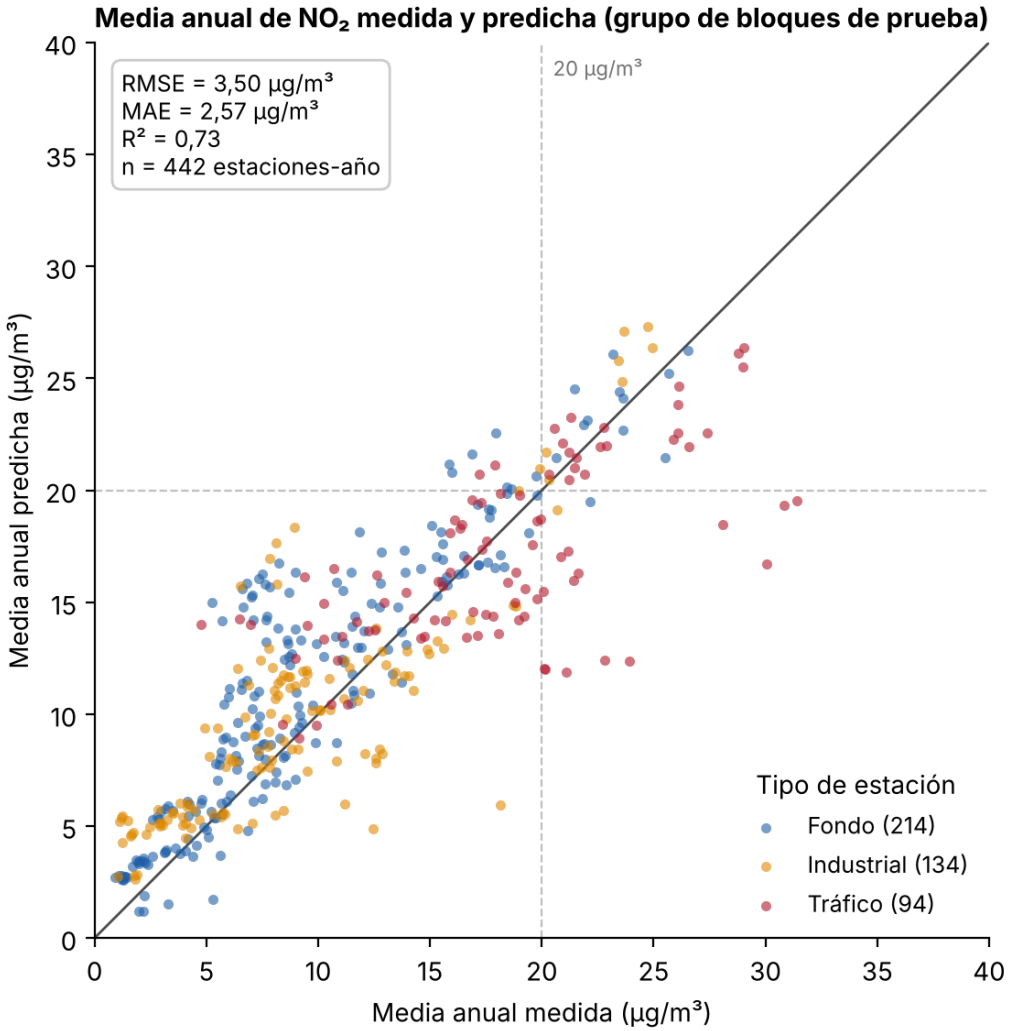


Figura 1. Media anual de NO_2 medida y predicha en las estaciones del grupo de bloques de prueba, por tipo de estación. La línea continua indica la coincidencia exacta.

3.2. Distribución espacial del NO_2

La Figura 2 muestra la media anual de NO_2 de 2024. La mayor parte del territorio peninsular presenta niveles bajos: la media de todas las celdas es de 3,2 µg/m³, y solo el 1,5 % de la superficie (7.354 km²) supera los 10 µg/m³ de la guía de la OMS. Los valores por encima de 20 µg/m³ se limitan a 707 km², el 0,14 % del territorio, concentrados sobre todo en las áreas metropolitanas de Madrid y Barcelona. Sin embargo, esas zonas son las más pobladas, de modo que la concentración media ponderada por población (12,6 µg/m³) es casi cuatro veces la media territorial.

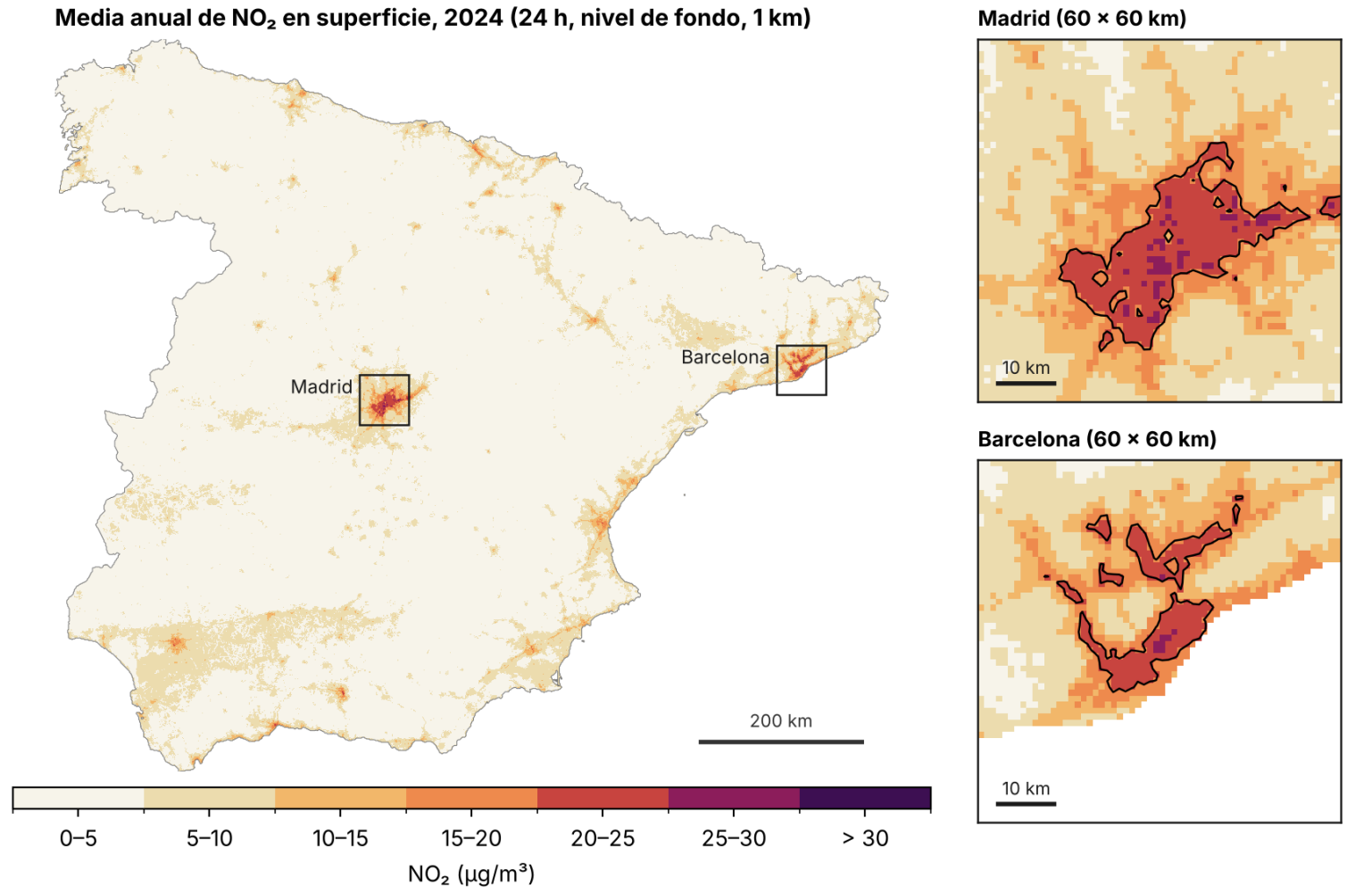


Figura 2. Media anual de NO_2 en superficie en 2024 (media de 24 horas, nivel de fondo, resolución de 1 km; estimación central), con ampliaciones de Madrid y Barcelona. En las ampliaciones, la línea negra delimita la zona por encima de 20 µg/m³.

3.3. Exposición de la población según los valores de referencia

El Cuadro 3 resume la exposición de la población peninsular en 2024 frente a cada valor de referencia. Todas las cifras son estimaciones centrales, acompañadas entre paréntesis de su intervalo del 90 %.

Cuadro 3. Exposición de la población peninsular al NO_2 en 2024.

Indicador	Estimación central (intervalo del 90 %)	Habitantes, en millones (intervalo del 90 %)
NO_2 medio ponderado por población	12,6 µg/m³ (12,0–13,2)	—
Población por encima de 10 µg/m³	58,9 % (56,0–61,4)	26,5 (25,2–27,6)
Población por encima de 20 µg/m³	17,3 % (14,1–20,2)	7,8 (6,3–9,1)
Población por encima de 40 µg/m³	0,0 % (0,0–0,0)	0,0
Población con más de 18 días por encima de 50 µg/m³	5,5 % (3,4–7,3)	2,5 (1,5–3,3)

En 2024, toda la población peninsular residía en zonas que cumplen el valor límite anual vigente como nivel de fondo. Sin embargo, el 17,3 % de la población (14,1–20,2 %), unos 7,8 millones de personas, vivía en zonas que cumplen el límite actual pero que superarían el de 20 µg/m³ aplicable desde 2030. Además, el 5,5 % (3,4–7,3 %), unos 2,5 millones de personas, residía en zonas que superarían el nuevo límite diario. Ambos grupos no deben sumarse, ya que una misma zona puede superar los dos límites. Con la guía de la OMS como referencia, la población afectada asciende al 58,9 %. El Cuadro 4 detalla cómo se reparte la población entre tramos de concentración.

Cuadro 4. Población peninsular por tramos de la media anual de NO_2 en 2024.

Media anual (µg/m³)	Habitantes, en millones (intervalo del 90 %)	% de la población	Situación respecto a los valores de referencia
0–10	18,5 (17,3–19,6)	41,2	Por debajo de la guía de la OMS
10–15	11,0 (10,5–11,7)	24,5	Por encima de la guía de la OMS; cumple el límite de 2030
15–20	7,6 (6,9–8,4)	16,9	Por encima de la guía de la OMS; cumple el límite de 2030
20–25	5,0 (4,4–5,6)	11,2	Cumple el límite vigente; supera el de 2030
25–30	2,2 (1,4–3,0)	5,0	Cumple el límite vigente; supera el de 2030
30–40	0,5 (0,2–1,0)	1,1	Cumple el límite vigente; supera el de 2030
Más de 40	0,0 (0,0–0,0)	0,0	Supera el límite vigente

De los 7,8 millones de personas que en 2024 residían por encima de 20 µg/m³, unos 5 millones lo hacían en zonas entre 20 y 25 µg/m³, algo más de 2 millones entre 25 y 30 µg/m³ y en torno a medio millón por encima de 30 µg/m³. La Figura 3 muestra este reparto para los cinco años.

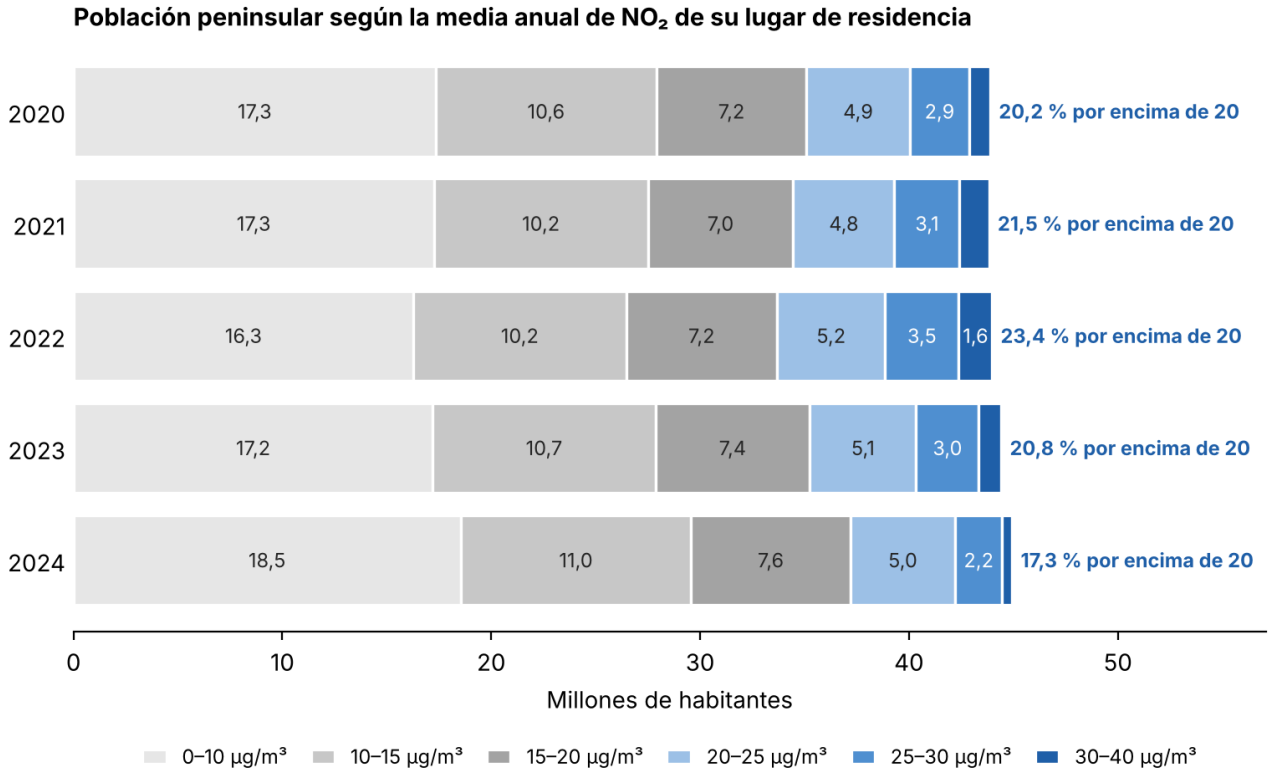


Figura 3. Población peninsular en cada tramo de la media anual de NO_2 de su lugar de residencia, 2020–2024 (millones de habitantes, estimación central). En azul, los tramos que cumplen el límite vigente pero superan el de 2030. A la derecha, porcentaje de la población por encima de 20 µg/m³.

La población por encima de 20 µg/m³ osciló entre el 20 % y el 23 % en los cuatro primeros años y bajó al 17 % en 2024. El descenso es más acusado en el límite diario: del 9–12 % de la población entre 2020 y 2023 al 5,5 % en 2024. Con solo cinco años, estos cambios no deben interpretarse todavía como una tendencia, pero son coherentes con la mejora de los niveles de NO_2 que recogen los informes anuales de evaluación de la calidad del aire del MITECO.

3.4. Exposición por grupos de población

A continuación se desglosa la exposición de 2024 por edad, por renta y por tipo de equipamiento sensible, con el mismo criterio que en el apartado anterior.

Edad. Las diferencias entre grupos de edad son pequeñas y quedan dentro de los intervalos de incertidumbre (Cuadro 5 y Figura 4). Los menores de 15 años y los mayores de 64 se distribuyen en el territorio de forma parecida al resto de la población, y su exposición media difiere en torno a

0,3 µg/m^3. En términos absolutos, alrededor de 1,1 millones de menores de 15 años y 1,6 millones de personas de 65 años o más residían en 2024 en zonas por encima de 20 µg/m^3.

Cuadro 5. Exposición al NO_2 por grupo de edad en 2024.

Grupo de edad	Población (millones)	NO_2 medio (µg/m^3)	Por encima de 10 µg/m^3 (%)	Por encima de 20 µg/m^3 (%)
Menores de 15 años	6,40	12,7 (12,1–13,3)	59,5 (56,9–62,4)	16,6 (13,6–19,2)
De 15 a 64 años	29,64	12,7 (12,1–13,3)	59,1 (56,6–61,8)	17,5 (14,6–20,2)
65 años o más	8,92	12,4 (11,8–12,9)	57,2 (54,9–59,7)	17,5 (14,4–20,0)
Conjunto de la población	44,97	12,6 (12,0–13,2)	58,9 (56,0–61,4)	17,3 (14,1–20,2)

Renta. En el conjunto de la península, la exposición aumenta con la renta. En el quintil de secciones censales con mayor renta, la concentración media de NO_2 es unos 5 µg/m^3 superior a la del quintil de menor renta, y la proporción de población por encima de 20 µg/m^3 es aproximadamente el triple. Este resultado refleja sobre todo la diferencia entre el medio urbano y el rural, ya que las grandes ciudades concentran a la vez las rentas más altas y los niveles más altos de NO_2. Dentro de las ciudades la relación se invierte: en el 64 % de los municipios peninsulares de más de 50.000 habitantes, las secciones con menor renta del municipio están más expuestas que las de mayor renta, aunque la diferencia es pequeña (mediana de 0,36 µg/m^3).

Equipamientos sensibles. El Cuadro 6 indica cuántos equipamientos se sitúan en celdas por encima de 20 µg/m^3. Las escuelas infantiles son el equipamiento más expuesto: el 25,3 % (19,7–29,8 %) se encuentra en celdas por encima de 20 µg/m^3, frente al 15,1 % de los hospitales y el 13,5 % de los centros educativos. Las residencias de mayores son las menos expuestas (8,0 %). En conjunto, unos 3.500 equipamientos sensibles se sitúan en zonas que superarían el límite anual de 2030.

Cuadro 6. Equipamientos sensibles situados en celdas por encima de 20 µg/m^3 de media anual en 2024.

Equipamiento	Total	Por encima de 20 µg/m^3: número (intervalo del 90 %)	Por encima de 20 µg/m^3: % (intervalo del 90 %)
Escuelas infantiles	3.287	830 (649–980)	25,3 (19,7–29,8)
Hospitales	1.116	169 (131–204)	15,1 (11,7–18,3)
Centros educativos	17.930	2.412 (1.969–2.780)	13,5 (11,0–15,5)
Residencias de mayores	1.545	124 (96–152)	8,0 (6,2–9,8)

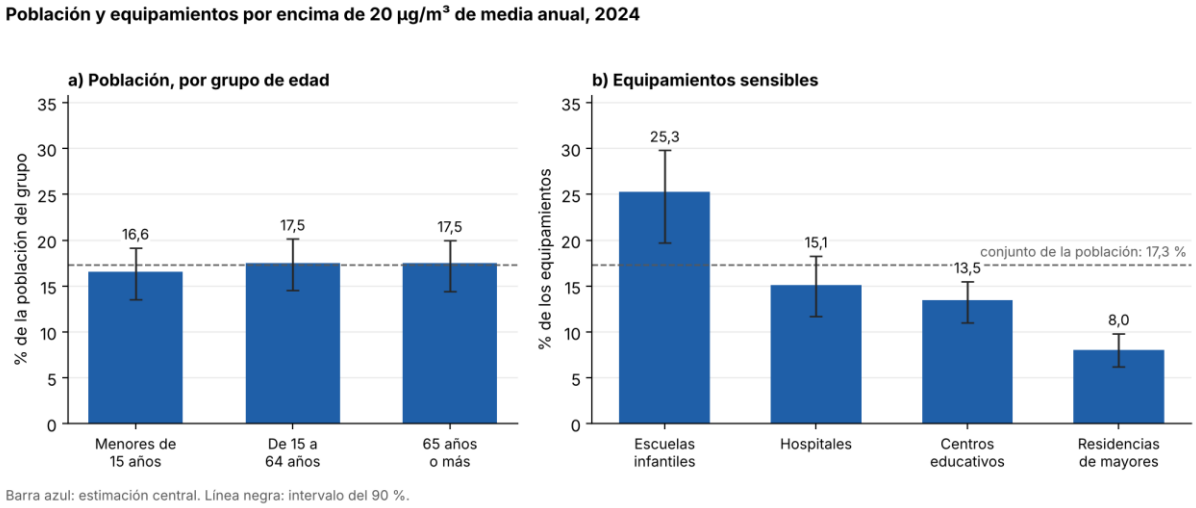


Figura 4. Población y equipamientos por encima de 20 µg/m³ de media anual en 2024: a) población por grupo de edad; b) equipamientos sensibles. La línea discontinua indica el valor del conjunto de la población.

3.5. Distribución territorial

La población por encima del límite de 2030 se concentra en Madrid y Cataluña (Figura 5).

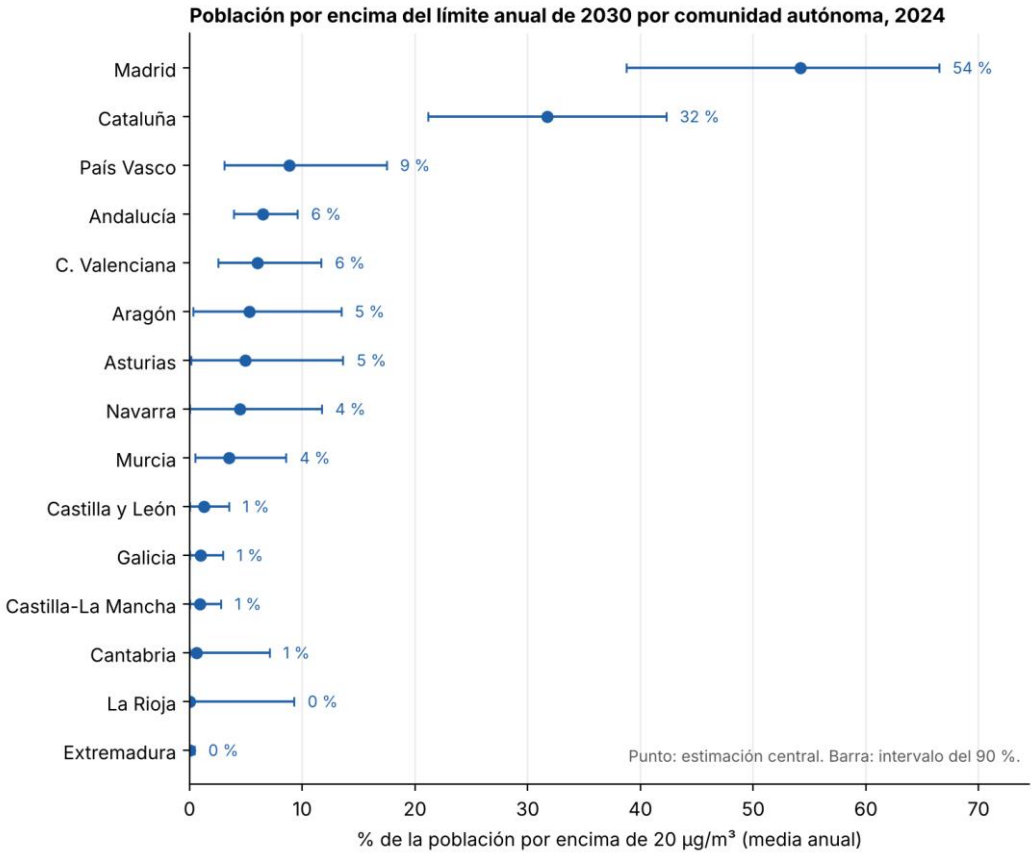


Figura 5. Población por encima de 20 µg/m³ de media anual por comunidad autónoma en 2024.

En 2024, el 54 % (39–66 %) de la población de la Comunidad de Madrid y el 32 % (21–42 %) de la de Cataluña residía por encima de 20 µg/m^3; entre ambas suman en torno a ocho de cada diez habitantes peninsulares en esa situación. En el resto de comunidades el porcentaje es inferior al 10 %, con intervalos que en varios casos incluyen el cero.

4. Conclusiones

Cumplir el valor límite anual vigente no garantiza cumplir el que se aplicará a partir de 2030. En 2024, toda la población peninsular residía en zonas por debajo de 40 µg/m³ como nivel de fondo, pero el 17,3 % (14,1–20,2 %), unos 7,8 millones de personas, lo hacía por encima de 20 µg/m³, y el 5,5 % (3,4–7,3 %) en zonas que superarían el nuevo límite diario. Esta población se concentra en las áreas metropolitanas de Madrid y Barcelona, no presenta diferencias apreciables por edad e incluye en torno a una cuarta parte de las escuelas infantiles. Los mapas representan el nivel de fondo, y no los valores más altos que se registran junto a las vías con más tráfico. Por tanto, estas cifras deben entenderse como una estimación conservadora de la población afectada.

El trabajo muestra también que la combinación de las observaciones de TROPOMI con las medidas de las estaciones, la meteorología y la información sobre el territorio permite estimar el NO_2 en superficie con una resolución de 1 km y un error de la media anual de unos 2,6 µg/m³ en zonas sin estación, y acompañar cada cifra de exposición de su margen de incertidumbre. Esta información complementa a la red de medida, en línea con el papel que la Directiva (UE) 2024/2881 otorga a la modelización, y resulta especialmente útil para los municipios de más de 50.000 habitantes que disponen de una sola estación o de ninguna, a los que ofrece una referencia homogénea para diseñar y evaluar sus planes de movilidad urbana sostenible y sus zonas de bajas emisiones. Sus principales limitaciones son la resolución, que no distingue entre calles. La actualización anual de los mapas permitirá seguir la evolución de la población expuesta hasta 2030.

5. Bibliografía

[1] España (2021): “Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética”, Boletín Oficial del Estado, 121, de 21 de mayo de 2021.

[2] Giosa, R., Morillas, C., Alvarez, S., Serio, C., Masiello, G., Liuzzi, G., & Martinez, S. (2026). Surface NO_2 estimation in the Madrid region from Sentinel-5P and ERA5-Land meteorological data using machine learning techniques. Advances in Space Research.

[3] Hersbach et al. (2020): Hersbach, H., B. Bell, P. Berrisford, S. Hirahara, A. Horányi, J. Muñoz-Sabater et al. (2020): “The ERA5 global reanalysis”, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146 (730): 1999-2049.

[4] Kuenen et al. (2022): Kuenen, J., S. Dellaert, A. Visschedijk, J.-P. Jalkanen, I. Super y H. Denier van der Gon (2022): “CAMS-REG-v4: a state-of-the-art high-resolution European emission inventory for air quality modelling”, Earth System Science Data, 14 (2): 491-515.

[5] MITECO (2025): “Evaluación de la calidad del aire en España. Año 2024”, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid.

[6] Morillas et al. (2026): Morillas, C., R. Giosa, S. Álvarez, C. Serio, G. Masiello, G. Liuzzi, C. Avilés y S. Martínez (2026): “Estimating surface-level NO2 concentrations in the Madrid region using Sentinel-5P observations and ground-based meteorological data with machine learning approaches”, Atmospheric Environment, 373: 121904.

[7] Muñoz-Sabater et al. (2021): Muñoz-Sabater, J., E. Dutra, A. Agustí-Panareda, C. Albergel, G. Arduini, G. Balsamo et al. (2021): “ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications”, Earth System Science Data, 13 (9): 4349-4383.

[8] OMS (2021): “WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide”, Organización Mundial de la Salud, Ginebra.

[9] Shetty et al. (2024): Shetty, S., P. Schneider, K. Stebel, P.D. Hamer, A. Kylling y T.K. Berntsen (2024): “Estimating surface NO2 concentrations over Europe using Sentinel-5P TROPOMI observations and Machine Learning”, Remote Sensing of Environment, 312: 114321.

[10] Unión Europea (2024): “Directiva (UE) 2024/2881 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2024, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa (versión refundida)”, Diario Oficial de la Unión Europea, L, 2024/2881, de 20 de noviembre de 2024.

CONAMA 2026