

# Sistema nacional español de monitorización de emisiones de gases de efecto invernadero

## Documento metodológico para la estimación de emisiones diarias de gases de efecto invernadero por actividad a baja latencia

Paula Castesana<sup>1</sup>, Marc Guevara<sup>1</sup>, Paula Camps<sup>1</sup>, Johanna Gehlen<sup>1</sup>, Laura Herrero<sup>1</sup>, Oliver Legarreta<sup>1</sup>, Iván Lombardich<sup>1</sup>, Carmen Piñero<sup>1</sup>, Luca Rizza<sup>1</sup>, Carles Tena<sup>1</sup>, Artur Viñas<sup>1</sup>, Oriol Jorba<sup>1</sup>, Carlos Pérez García-Pando<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Barcelona Supercomputing Center - Centro Nacional de Supercomputación.

<sup>2</sup> ICREA, Catalan Institution for Research and Advanced Studies, Barcelona, Spain.



### Cómo citar

Castesana, P.; Guevara, M.; Camps, P.; Gehlen, J.; Herrero, L.; Legarreta, O.; Lombardich, I.; Piñero, C.; Rizza, L.; Tena, C.; Viñas, A.; Jorba, O.; Pérez García-Pando, C. (2026). Sistema nacional español de monitorización de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI): documento metodológico para la estimación de emisiones diarias de GEI por actividad a baja latencia. Departamento de Ciencias de la Tierra, Barcelona Supercomputing Center (BSC), Barcelona, España. <https://doi.org/10.82201/TZIQJL>.

## Índice

|                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Acerca de RESPIRE-CLIMA.....</b>                                                                    | <b>3</b>  |
| <b>Metodología para la estimación de emisiones diarias de GEI por actividad en baja latencia .....</b> | <b>5</b>  |
| 1.    Dominios de trabajo operacionales .....                                                          | 6         |
| 2.    Emisiones sectoriales .....                                                                      | 8         |
| 2.1    Generación de electricidad.....                                                                 | 9         |
| 2.2    Procesos industriales .....                                                                     | 9         |
| 2.2.1    Fabricación de hierro y acero.....                                                            | 9         |
| 2.2.1.1    Fabricación de cemento.....                                                                 | 10        |
| 2.2.2    Combustión residencial y comercial.....                                                       | 11        |
| 2.3    Emisiones fugitivas de gas natural.....                                                         | 12        |
| 2.3.1    Transmisión y Almacenamiento .....                                                            | 13        |
| 2.3.2    Distribución.....                                                                             | 15        |
| 2.4    Quema abierta de biomasa .....                                                                  | 16        |
| 2.5    Transporte por carreteras.....                                                                  | 17        |
| 2.5.1    Transporte interurbano .....                                                                  | 17        |
| 2.5.2    Transporte urbano .....                                                                       | 19        |
| 2.6    Transporte marítimo .....                                                                       | 20        |
| 2.7    Aviación .....                                                                                  | 22        |
| <b>Referencias .....</b>                                                                               | <b>23</b> |

## Acerca de RESPIRE-CLIMA

Los fondos Next Generation EU se implementan en España a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTyR). En el marco de este plan, la modernización de las infraestructuras y los servicios meteorológicos fue identificada como una de las áreas prioritarias de inversión, asignándose a la Agencia Estatal de Meteorología ([AEMET](#)) financiación para modernizar las redes de observación y desarrollar servicios meteorológicos avanzados en el contexto del cambio climático. Entre las actuaciones financiadas se encuentra “Sistema nacional de emisiones de alta resolución para la predicción de la calidad del aire y la monitorización de gases de efecto invernadero”, una iniciativa liderada por el Barcelona Supercomputing Center ([BSC](#)) que da lugar al proyecto [RESPIRE](#) (high Resolution Emission System to support modelling and monitoring efforts in Spain). Esta actuación mantiene una fuerte sinergia con otras dos actuaciones lideradas por AEMET, organismo responsable del sistema nacional de predicción de la calidad del aire y de la red de monitorización de gases de efecto invernadero (GEI), dedicadas a la instalación y despliegue de la red nacional [COCCON](#)-España para la monitorización de GEI, así como a la creación del repositorio nacional de observaciones de GEI [1].

RESPIRE tiene como objetivo reforzar las capacidades estratégicas de España para apoyar una mejor toma de decisiones en materia de control de la contaminación atmosférica y mitigación del cambio climático. Este proyecto está formado por dos componentes específicos: RESPIRE-AIRE, centrado en la modelización de las emisiones de contaminantes atmosféricos en España, y **RESPIRE-CLIMA, un sistema nacional de monitorización de emisiones de GEI**.

El objetivo principal de **RESPIRE-CLIMA** es diseñar, construir e implementar un servicio nacional de monitorización de emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) combinando datos de emisiones basados en actividad, a cargo del BSC, con datos los derivados de observaciones que surjan de las actuaciones de AEMET.

El **sistema de emisiones basadas en actividad de RESPIRE-CLIMA** se estructura en tres pilares fundamentales (Figura 1): (i) el desarrollo de mapas anuales de emisiones de GEI; (ii) el desarrollo de un sistema de emisiones de GEI de baja latencia; y (iii) el desarrollo de una aplicación web.

Mapas anuales de emisiones de GEI: este pilar utiliza el sistema basado en Python y de código abierto High-Elective Resolution Modelling Emission System versión delta ([HERMES Δ](#)) [2], desarrollado ad hoc por el BSC en el marco de RESPIRE-AIR, y que permite desagregar espacialmente los inventarios oficiales de España de GEI reportados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) a través del Sistema Español de Inventario de Emisiones ([SEIE](#)) en el marco del Convenio Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático [3]. El resultado es una colección de mapas anuales de emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> con una resolución espacial de 1 km<sup>2</sup>, organizados por sector siguiendo el sistema de Nomenclatura Cuadrícula para Reportes (GNFR), con el objetivo de apoyar a las entidades subnacionales al proporcionar información útil sobre emisiones [4].

Sistema de emisiones diarias de GEI: este pilar es el producto de emisiones de baja latencia de RESPIRE-CLIMA en el que se centra este documento metodológico. Se trata de un

sistema a través del cual las emisiones son estimadas y reportadas con un retraso de hasta 3 meses desde que fueron emitidas. Bajo este pilar se ha desarrollado otro sistema de código abierto basado en Python, el sPanish EmissioN mOnitoring system for grEeNhouse gAses (**PHENOMENA**) [5], compuesto por cuatro módulos principales:

1. El módulo de **descarga** se encarga de recopilar datos de actividad de baja latencia y alta resolución temporal provenientes de múltiples bases de datos, incluyendo datos públicos (por ejemplo, generación eléctrica, flujos de gas natural, congestión y conteo de tráfico, o temperatura superficial) y datos comerciales sobre tráfico aéreo y marítimo.
2. El módulo de **preprocesamiento** tiene la función de estandarizar y dar formato a los datos de actividad recopilados, incluyendo rutinas de llenado de vacíos, control de calidad y protocolos de fallo, para garantizar que los datos sean adecuados para la estimación de emisiones.
3. El módulo de **estimación de emisiones** es responsable de estimar las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> basándose en datos de actividad y factores de emisión, tal como se describe a continuación.
4. El módulo de **postprocesamiento**, diseñado para combinar y producir los productos finales de emisiones de GEI que son explotados a través de la aplicación web.

**Aplicación web:** este pilar se enfoca en el desarrollo y mantenimiento de la [aplicación web](#) para la visualización, el análisis y la descarga de los datos de emisiones generados por HERMES\_Δ y PHENOMENA en el marco de RESPIRE-CLIMA.

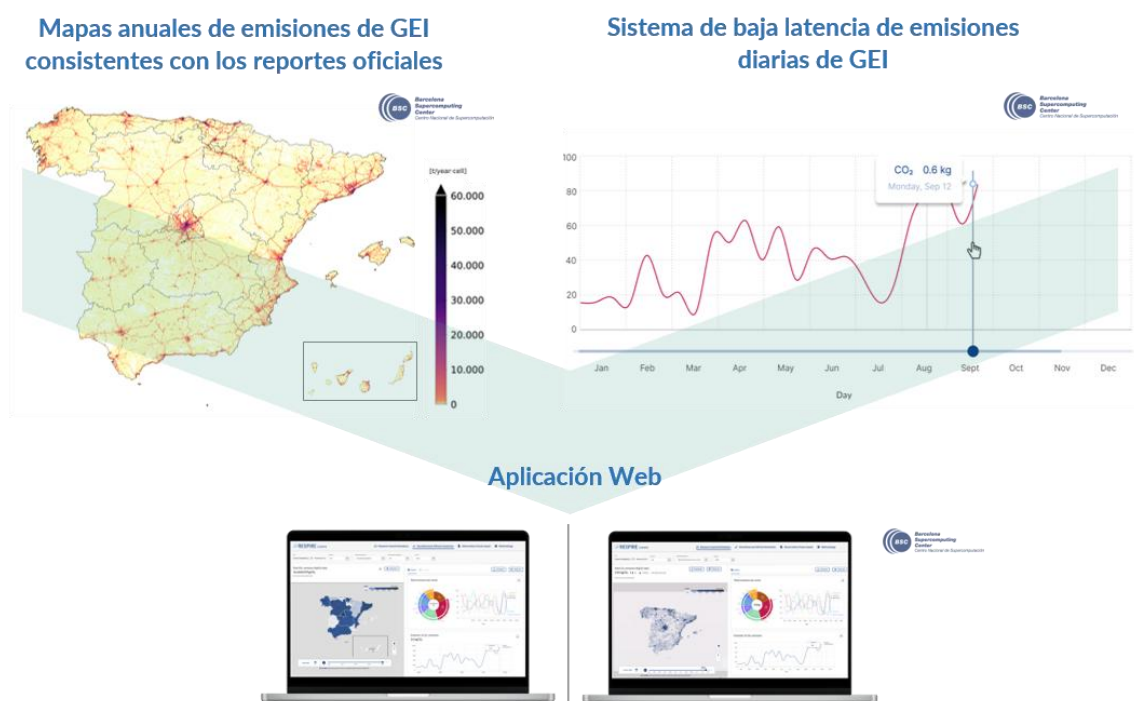


Figura 1: Esquema de los productos principales de RESPIRE-CLIMA.

Cabe mencionar que los conjuntos de datos y productos desarrollados en RESPIRE-CLIMA se encuentran en evolución continua y pueden ser modificados periódicamente como resultado de la incorporación de nueva información, mejoras metodológicas, revisiones técnicas o procesos de validación y corrección. En consecuencia, los resultados disponibles en la plataforma pueden variar entre distintas versiones o fechas de actualización. Cada archivo, visualización o producto descargable se encuentra asociado a la versión metodológica vigente al momento de su consulta o descarga.

Asimismo, cabe señalar que, a diferencia de las estimaciones presentadas en la sección [Emisiones Anuales](#) de este portal web, las estimaciones de [Emisiones Diarias](#) pueden diferir de las reportadas en los inventarios oficiales de GEI del MITECO, no solo debido a diferencias metodológicas, sino también a su carácter de baja latencia, ya que incorporan información hasta fechas recientes, mientras que los inventarios oficiales se publican con un desfase de al menos dos años respecto al período reportado.

## Metodología para la estimación de emisiones diarias de GEI por actividad en baja latencia

La Tabla 1 resume las metodologías de estimación de emisiones implementadas dentro del sistema PHENOMENA, que proporciona estimaciones en baja latencia (con un retraso de hasta 3 meses) para las especies CO<sub>2</sub> (fuentes fósiles) y CH<sub>4</sub>, para los siguientes sectores y subsectores:

1. Generación de electricidad: Gas Natural; Combustibles Líquidos; Carbón.
2. Industria manufacturera: Fabricación de Cemento (combustión y proceso); Fabricación de Hierro y Acero (proceso).
3. Combustión residencial y comercial: Gas Natural; Gase Licuado de Petróleo (GLP); Carbón; Otros.
4. Emisiones fugitivas de gas natural: Transmisión y Almacenamiento; Distribución.
5. Quema abierta de biomasa.
6. Transporte por carreteras: vehículos Ligeros, Pesados y Motocicletas. Este sector es estimado a partir de la combinación de dos componentes: (a) Pauta de conducción interurbana y rural, (b) Paula de conducción urbana.
7. Transporte marítimo: Buques de Carga; Cisterna, Pasajeros; Pesca; Cruceros; Otros.
8. Aviación: Ciclo de despegue y aterrizaje.

Las siguientes secciones describen en detalle las metodologías y bases de datos aplicadas a cada sector. Los resultados de emisiones obtenidos con PHENOMENA se publican en la sección [Emisiones diarias](#) de la aplicación web de RESPIRE-CLIMATE.

Tabla 1: Resumen de las metodologías de estimación de emisiones aplicadas por PHENOMENA.

| Sector                                          | Enfoque                             | Descripción                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| (1) Generación de electricidad                  | Bottom-up (a nivel de instalación)  | Combinación de factores de actividad (electricidad producida) con factores de emisión (por tipo de combustible/tecnología) por central térmica.                                                                                   |
| (2.1) Fabricación de cemento                    | Bottom-up (a nivel de instalación)  | Combinación de factores de actividad (cemento producido) con factores de emisión por cementera. Incluye emisiones por consumo de energía a nivel de instalación.                                                                  |
| (2.2) Fabricación de hierro y acero             | Bottom-up (a nivel de instalación)  | Combinación de factores de actividad (acero producido) con factores de emisión por acerería.                                                                                                                                      |
| (3) Combustión residencial y comercial          | Downscaling                         | Combinación de las emisiones anuales del <a href="#">SEIE</a> <sup>1</sup> distribuidas espacialmente a una malla de 1kmx1km con factores de desagregación temporal diarios calculados con el método días-grado de calentamiento. |
| (4) Emisiones fugitivas de gas natural          | Bottom-up (a nivel de subactividad) | Combinación de factores de actividad (demanda de gas natural por usuario, demanda de gas por actividad del sistema de transmisión) con factores de emisión implícitos derivados del inventario oficial de emisiones de GEI.       |
| (5) Quema abierta de biomasa                    | Top-down (basado en satélite)       | Emisiones estimadas por GFASv1.4.2                                                                                                                                                                                                |
| (6) (a) Transporte rodado (interurbano + rural) | Bottom-up (a nivel de tramo)        | Combinación de factores de actividad (conteos de tráfico) con factores de emisión por tipo de vehículo reportados en el inventario oficial de emisiones de GEI.                                                                   |
| (6) (b) Transporte rodado (urbano)              | Bottom-up (a nivel de tramo)        | Combinación de las emisiones anuales del SEIE distribuidas espacialmente a una malla de 1kmx1km, pesadas por actividad basada en datos de viajes-km para las principales ciudades del país.                                       |
| (7) Transporte marítimo                         | Bottom-up (a nivel de barco)        | Combinación de factores de actividad (consumo de combustible) con factores de emisión, por barco.                                                                                                                                 |
| (8) Aviación                                    | Bottom-up (a nivel de aeronave)     | Combinación de factores de actividad (consumo de combustible) con factores de emisión por aeronave, por fase CAD (ciclo de aterrizaje y despegue).                                                                                |

<sup>1</sup>Sistema Español de Inventario de Emisiones (SEIE), mantenido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (UNFCCC) [3].

## 1. Dominios de trabajo operacionales

Los dominios de trabajo operacionales de PHENOMENA fueron definidos para para el área peninsular de España e Islas Baleares, y para el área que incluye a las Islas Canarias. Para ello, se tuvo en cuenta la inclusión de (a) el espacio aéreo español (FIR áreas en la Figura 2, por las siglas en inglés de Flight Information Region), a fin de incluir las emisiones provenientes de actividades de aviación; (b) la zona económica exclusiva de España (EEZ áreas en la Figura 2), a fin de incluir las emisiones provenientes de navegación en todo el territorio marítimo en el que el Estado Español tiene jurisdicción y soberanía; y (c) un buffer de 5 km alrededor de los dominios preliminares (PHENOMENA Extended Domains en la Figura 2), a fin de evitar la pérdida de información en los bordes del dominio a la hora de estimar emisiones.

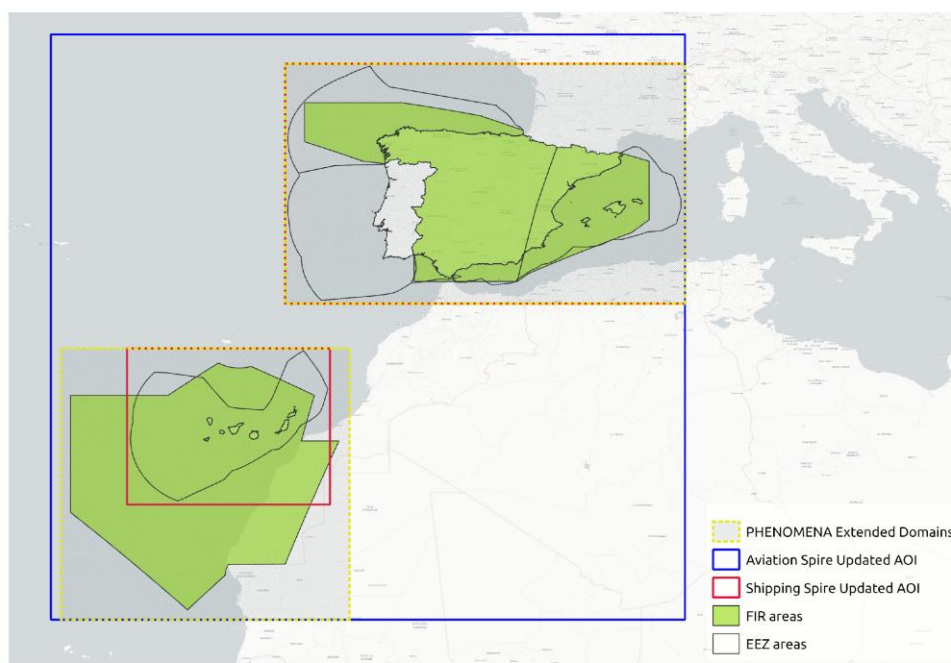


Figura 2: Definición de dominios utilizados por PHENOMENA, incluyendo el espacio aéreo español (FIR áreas), la zona económica exclusiva de España (EEZ áreas), y un buffer de 5 km alrededor de los dominios preliminares (PHENOMENA extended domains).

A su vez, se han incluido las divisiones regionales correspondientes al segundo nivel de la Nomenclatura de las Unidades Territoriales Estadísticas (NUTS2), que comprenden las 17 Comunidades Autónomas (CCAA) y las 2 Ciudades Autónomas (Ceuta y Melilla) de España. Se definieron también Regiones Metropolitanas, seleccionando los principales centros urbanos dentro de cada una de las CCAA del país (Figura 3): Albacete, Asturias (como la combinación de los municipios de Gijón y Oviedo), Badajoz, Barcelona, Bilbao, Las Palmas de Gran Canaria, Logroño, Madrid, Murcia, Palma de Mallorca, Pamplona, Santander, Sevilla, Valencia, Valladolid, Vigo y Zaragoza. En los casos en los que la misma Comunidad Autónoma ha definido formalmente su área urbana, PHENOMENA utiliza esa delimitación. En los casos en los que dicha delimitación no es oficial a nivel de comunidad, se han tomado como referencia fuentes alternativas como el listado de áreas urbanas por municipios del Ministerio de Transportes [6], o la delimitación publicada por la Dirección General de Economía para el caso de Madrid [7].

Por último, a fin de asignar emisiones del transporte marítimo a las divisiones regionales NUTS2 y a las Regiones Metropolitanas, se ha realizado una extensión de dominio incluyendo las Zonas de Servicio de cada uno de los puertos de las CCAA, que son delimitadas por Puertos del Estado [8]. La Figura 4 muestra un ejemplo de este trabajo de extensión de dominio, aplicado al puerto de Barcelona.

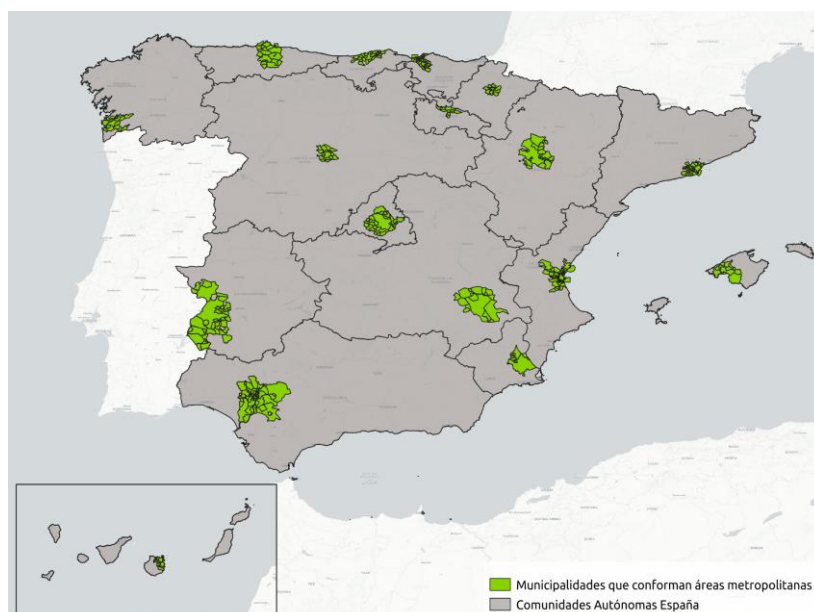


Figura 3: Definición de dominios utilizados por PHENOMENA para las áreas metropolitanas de las distintas comunidades autónomas de España.

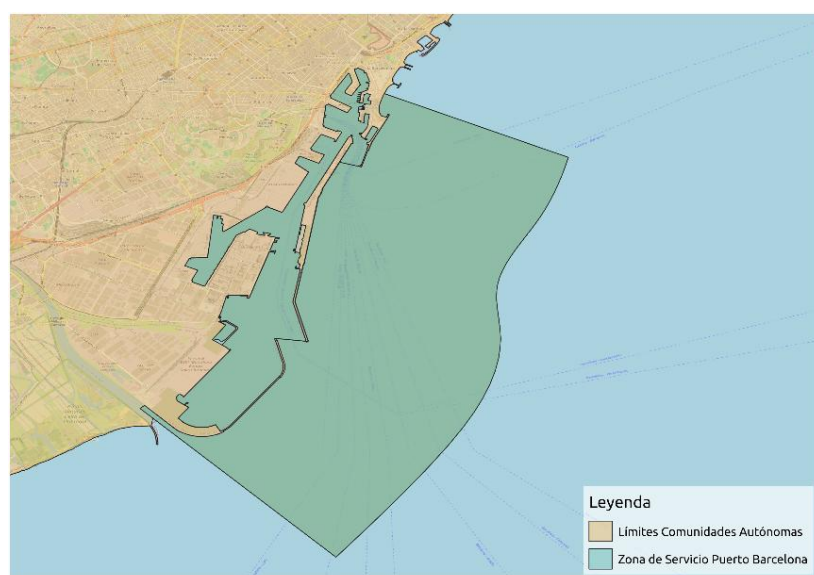


Figura 4: Extensión de dominio incluyendo la zona portuaria de Barcelona.

## 2. Emisiones sectoriales

Se han desarrollado e implementado metodologías de estimación de emisiones de GEI específicas para cada fuente contaminante, combinando datos de baja latencia y alta resolución temporal con técnicas de estimación de emisiones y factores de emisión que cumplen con el estado del arte. Estas metodologías incluyen (i) enfoques “bottom-up”, a través de los cuales las emisiones se estiman de manera individual (e.g., para cada industria, avión, o barco) para subsecuentemente agregarse a nivel de celda de la grilla de trabajo o a nivel regional (CCAA, Regiones Metropolitanas); y (ii) métodos de “downscaling”,

a través de los cuales las emisiones se estiman primero a nivel de sector y subsecuentemente se distribuyen espacial y temporalmente.

## 2.1 Generación de electricidad

Este sector incluye las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> derivadas de la generación de electricidad en centrales térmicas públicas españolas. PHENOMENA utiliza como datos de actividad la información horaria de electricidad generada por central térmica individual reportada por la Red Europea de Gestores de Redes de Transporte de Electricidad para la Península Ibérica [9]. Para las centrales térmicas de los sistemas eléctricos de las Islas baleares, Islas Canarias, Ceuta y Melilla se tienen en cuenta los datos horarios de electricidad generada por sistema eléctrico y combustible que reporta la Red Eléctrica Española (REE) [10]. Estos datos son distribuidos entre las distintas centrales térmicas en función de la capacidad instaladas de cada planta. Ambas bases de datos proveen información con una latencia de 1 día.

Los datos de actividad (*AD*) son combinados con los factores de emisión (*EF*) de CO<sub>2</sub> proporcionados por la REE, por tipo de combustible y sistema eléctrico (peninsular y no peninsular), y con los factores de emisión de CH<sub>4</sub> sugeridos por el IPCC para el Nivel 1 de su metodología de estimación de emisiones [11]. La combinación de esta información permite obtener el total de emisiones por instalación *i*, por tipo de combustible *f* y por hora, que son posteriormente agregadas a nivel diario (*E<sub>i,f,d</sub>*) de la siguiente manera:

(1)

$$E_{CO_2,i,f,d} = EF_{CO_2,f} \cdot AD_{i,f,d}, \quad E_{CH_4,i,f,d} = EF_{CH_4,f} \cdot AD_{i,f,d}$$

La distribución espacial de las emisiones se realizó asignando las emisiones correspondientes a cada instalación sobre un shapefile conteniendo la ubicación de cada planta, a partir de las bases de datos LPS [12], PRTR [13].

## 2.2 Procesos industriales

### 2.2.1 Fabricación de hierro y acero

Las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del proceso de fabricación de hierro y acero son estimadas a partir de un enfoque de tipo bottom-up, combinando datos de producción con factores de emisión sugeridos por el IPCC [11] de acuerdo con cada tipo de instalación. Los datos de actividad son tomados de la World Steel Association [14], que provee, bajo suscripción, información mensual sobre la producción de arrabio de hierro y de acero en España agregados a nivel nacional. En España se cuenta con una única acería integral en Asturias-Gijón (*i.e.*, con producción de acero a partir de arrabio obtenido por reducción del mineral de hierro con tecnología de alto horno), mientras que el resto de las instalaciones producen acero a través de la ruta eléctrica (*i.e.*, producción de acero a partir de la fundición de chatarra en hornos de arco eléctrico) [15]. Asumiendo que el arrabio producido en los altos hornos de Gijón se destina principalmente a la producción de acero [16], PHENOMENA estima las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al proceso de producción de acero por ruta integral en Asturias-Gijón combinando los datos mensuales de producción de arrabio para España con el factor de emisión de la metodología de Nivel 1 del IPCC [11], que contempla tanto las

emisiones asociadas a la obtención del arrabio por reducción del mineral de hierro como las emisiones asociadas al proceso de decarburación para la obtención del acero final. A partir de esto, se deduce que la producción de acero por ruta eléctrica en España se puede estimar de manera aceptable a partir de la diferencia entre la producción de acero total y la producción de arrabio (convertida en acero en la acería integral de Gijón). Las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del proceso por ruta eléctrica son estimadas a partir de la combinación del valor resultante para la producción mensual con el factor de emisión de la metodología de Nivel 1 del IPCC para dicha tecnología.

Debido a la falta de disponibilidad de información más detallada, las emisiones de este sector son estimadas en base mensual, y luego llevadas a emisiones diarias aplicando perfiles temporales planos, asumiendo que una producción relativamente homogénea para los diferentes días de la semana dentro de cada mes.

En esta sección no se incluyen las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de la producción de sinterizado o de la producción de hierro, que en España sólo tendrían lugar en la planta integral de Gijón. Tampoco se incluyen las emisiones asociadas a la quema de combustibles para usos energéticos en ninguna de las plantas de hierro y acero.

La distribución espacial de las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la producción de hierro y acero se realiza asignando el total de las emisiones por ruta integral a la acería de Gijón, y atribuyendo las emisiones estimadas para la ruta eléctrica a la ubicación de cada instalación, pesándolas por la capacidad instalada de cada planta del país. La capacidad de las instalaciones más grandes de España fue tomada de los datos del Monitor de Energía Global (GEM) [17], mientras que la correspondiente a las plantas de menor envergadura fue estimada a partir de las emisiones de CO<sub>2</sub> reportadas en los datos LPS [12], utilizando una función lineal derivada de las emisiones y las capacidades de las primeras.

### 2.2.1.1 Fabricación de cemento

Las emisiones de GEI asociadas al proceso de producción de cemento ocurren fundamentalmente durante la calcinación de la piedra caliza, para, junto con yeso y otros compuestos, formar el componente principal que es el Clinker. Para la producción de Clinker se calina la piedra caliza, compuesta esencialmente de carbonato cálcico (CaCO<sub>3</sub>), a unos 900°C para generar óxido de calcio o cal (CaO), liberando CO<sub>2</sub> en el proceso. Posteriormente el CaO reacciona en el horno a altas temperaturas (entre 1.400–1.500 °C) con sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y óxidos de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), para formar silicatos, aluminatos y ferritas de calcio, principales constituyentes del Clinker [11]. El horno se calienta mediante la combustión de diferentes tipos de combustibles, generando emisiones de GEI asociadas a la combustión. En esta sección, se incluyen las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del proceso productivo y las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> provenientes de la quema de combustibles para usos energéticos asociados al proceso.

#### Emisiones de CO<sub>2</sub> del proceso

Las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del proceso de calcinación son estimadas a partir de la combinación de datos de producción de Clíinker<sup>1</sup> con factores de emisión sugeridos por el

---

<sup>1</sup>De acuerdo con la información detallada en el [SEIE](#), desde el año 2007 no se fabrica cemento natural en España.

IPCC [11]. Los datos de actividad son tomados de las Estadísticas del Cemento del Ministerio de Industria y Turismo [18], que provee información mensual sobre la producción de Clínter a nivel nacional y de cemento gris a nivel de CCAA. Con esta información, las emisiones de CO<sub>2</sub> atribuibles a cada CCAA  $k$  ( $E_{\text{cemento\_proceso}}^k$ ) son estimadas a partir de la siguiente expresión:

(2)

$$E_{\text{cemento\_proceso}}^k = MC_k \cdot R_{\text{Clínter/cemento}} \cdot FE_{\text{Clínter}}$$

donde  $MC_k$  es la masa de cemento gris producida en la región  $k$ ,  $R_{\text{Clínter/cemento}}$  es la relación entre el Clínter y el cemento producido a nivel nacional, y  $FE_{\text{Clínter}}$  el factor de emisión de CO<sub>2</sub> de la producción de Clínter tomado del método de Nivel 1 del Capítulo 2 del Volumen 3 de las Directrices del IPCC 2006 [11].

A continuación, las emisiones son asignadas a cada instalación  $i$  en función de la capacidad instalada, provista por la Agrupación de fabricantes de cemento de España [19], y la ubicación de cada planta, disponible en el portal de Climate Trace [20]. Por último, se aplica un perfil temporal homogéneo para convertir las emisiones mensuales en diarias, asumiendo una operación constante de las plantas de través de los distintos días de la semana.

#### Emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de la quema de combustibles para producción de cemento

Estas emisiones se computan combinando la estimación del consumo de combustibles asociado a la producción del Clínter (GJ) con los factores de emisión de cada tipo de combustible empleado (kg CO<sub>2</sub>/GJ, g CH<sub>4</sub>/GJ). Sin embargo, a falta de información detallada para esta actividad, el consumo de combustibles se estima utilizando el ratio entre el requerimiento energético y la producción de Clínter reportada por el SEIE para el año 2015 [21], y los factores de emisión empleados con los derivados del mix de combustibles de dicho año (Nivel 2 para CO<sub>2</sub>, Nivel 2 y 3 para CH<sub>4</sub> en el 2015).

La distribución espacial y temporal de estas emisiones se realiza siguiendo el procedimiento detallado para las emisiones provenientes de la calcinación de la piedra caliza en la sección anterior.

### 2.2.2 Combustión residencial y comercial

Las emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> derivadas de la combustión en los sectores residencial y comercial son estimadas a partir de los mapas de emisiones anuales de alta resolución espacial (1km<sup>2</sup>) obtenidos con HERMES\_Δ para el 2023, tanto para España peninsular, Islas Baleares y Canarias [4]. Las emisiones diarias son estimadas a nivel de cada celda a partir de la siguiente expresión, para cada una de las especies (CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), y para cada tipo de combustible  $i$  (Gas Natural, GLP, Carbón, y Otros.):

(3)

$$E_{i,x,d} = E_{i,x,y} \cdot FD_c \cdot f_i + E_{i,x,y} \cdot \frac{HDD_{x,d}}{HDD_{x,y}} \cdot (1 - f_i)$$

Donde  $E_{i,x,d}$  son las emisiones provenientes de la quema del combustible  $i$  en la celda  $x$  correspondientes a día  $d$ ,  $E_{i,x,y}$  son las emisiones del combustible  $i$  en la celda  $x$  correspondientes al año de referencia  $y$  (2023),  $f_i$  es la fracción de emisiones no ligadas a

actividades de calefacción de espacios (*i.e.*, cocción, calentamiento de agua) para el tipo de combustible  $i$ , y  $FD_c$  es el factor de peso utilizado para distribuir temporalmente dichas emisiones (para fines distintos al de calefacción) de acuerdo al día de la semana. En el segundo término se encuentran los parámetros  $HDD_{x,d}$ , que es el “Heating-Degree-Day” de la celda  $x$  del día  $d$ , y  $HDD_{x,y}$ , que hace referencia a la suma de todos los  $HDD_{x,d}$  del año de referencia  $y$ . El concepto de Heating-Degree-Day es utilizado para estimar la demanda de energía asociada a necesidades de calefacción, brindando información acerca de la cantidad de días en la que la temperatura exterior es inferior a lo que se considera como una temperatura de confort (usualmente 15,5 °C). Para estimar este parámetro se utilizan datos diarios de temperatura superficial procedentes de ERA5-Land [22], un producto proporcionado por el programa Copernicus que ofrece información detallada sobre el comportamiento de la temperatura a nivel del suelo, con una resolución espacial de 9 km<sup>2</sup>, y que ejecuta a su vez un algoritmo que permite adaptar estos datos grillados a la resolución de interés. Los parámetros  $f_i$  y  $FD_c$  son estáticos. El factor  $f$  se ha tomado de datos bibliográficos procedentes de las estadísticas del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía para el sector residencial [23], y se computa por tipo de combustible  $i$ : gas natural, gas licuado de petróleo (LPG), carbón, biomasa<sup>2</sup> y otros; mientras que los valores de  $FD_c$  asignados a cada día de la semana han sido estimados ad hoc a partir de información de consumo de gas natural para cocción y calentamiento de agua reportados por NaTran (ex GRTgaz), el operador de transporte de gas natural a alta presión de Francia, durante los meses de verano de los años 2021-2023 [24]. Si bien no se cuenta con información a nivel local para el desarrollo de estos factores semanales, se considera que se logró una buena aproximación de los usos no vinculados a calefacción de espacios, que incluso se podrá mejorar a futuro cuando se disponga de información local.

De esta manera, quedan definidos para este sector el aspecto temporal a partir de la aplicación de la Ecuación (3), y el aspecto espacial de los mapas de emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> de alta resolución, tomando como punto de partida los mapas de emisiones elaborados con HERMES\_Δ para el 2023, pesando las emisiones a nivel de cada grilla para los días más fríos a partir de datos de temperatura local diaria.

## 2.3 Emisiones fugitivas de gas natural

En esta sección se describe la metodología aplicada para la estimación de emisiones fugitivas derivadas de los subsectores Transmisión y Almacenamiento (T&S) del gas natural en España; y Distribución (D). Para este sector se ha tomado como año de referencia el 2022 para todos aquellos los cálculos basados en emisiones oficiales, como se detalla a continuación, previendo actualizarlo a la versión más reciente del SEIE en el corto plazo.

---

<sup>2</sup> A fin de mantener consistencia con las fuentes de emisión reportadas en los inventarios oficiales y, por lo tanto, en la sección de Emisiones Anuales de este portal web, en la sección de Emisiones Diarias no se incluyen los resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la quema de combustibles de origen biogénico dentro de los sectores considerados, aunque sí se incluyen las emisiones de CH<sub>4</sub>.

### 2.3.1 Transmisión y Almacenamiento

Dentro de esta categoría se incluyen las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de los almacenamientos subterráneos (en adelante, *us*), las estaciones compresoras (*cs*), las plantas de regasificación (*rg*) y los gasoductos de transporte de alta presión junto con las estaciones de regulación y medida distribuidos a lo largo de todo el país (*p*).

Las emisiones de esta categoría reportadas por el MITECO en el SEIE están basadas en cuestionarios individualizados de Enagás [25], principal empresa transportista de gas natural en España, y otros transportistas que proporcionan datos de fugas recogidos en las actividades de detección y reparación (metodología de Nivel 3 del IPCC). Dada la imposibilidad de predecir dichas fugas, o de conocer su ocurrencia con la desagregación espaciotemporal y con la latencia necesarias para este proyecto, se decidió basar esta metodología en estimaciones del SEIE [3]. De acuerdo con los lineamientos del IPCC, es posible estimar emisiones aplicando un método de Nivel 3 y luego retrocalcular los factores de emisión de Nivel 2 a partir de los resultados. Para este sector, y sin perder de vista las limitaciones que ello conlleva, se propuso realizar una adaptación de esto último: determinar los Factores de Emisión Implícitos (IEF) arrojados por el método nacional (country specific - CS), para luego emplearlos en metodologías basadas en datos de actividad (AD) y factores de emisión.

Para el caso de la T&S del gas natural, ha sido posible acceder a los datos de emisiones del SEIE desagregadas por subsistema (*rg*, *cs*, *us*, y *p*). A partir de esta información fue posible determinar el peso relativo  $w_{\alpha,2022}$  de cada subsistema  $\alpha$  sobre el total de las emisiones de T&S, para el año de referencia (2022). Sin embargo, no fue posible relacionar dichas emisiones a datos de actividad propios de cada subsistema, ya que, al tratarse de un sistema interconectado, todos los componentes se encuentran vinculados a la “Demanda Nacional” de gas natural. Por tal motivo, se decidió: (i) calcular un  $IEF_{T\&S}$  para toda la categoría, derivado de los resultados del SEIE del 2022 bajo la subcategoría 1B2b4 del *common reporting format* (CRF) y utilizando como dato de actividad la demanda nacional de gas natural de dicho año [26]; (ii) estimar las emisiones diarias a partir de la combinación de la demanda nacional diaria de gas natural de todo el país [27] y del  $IEF_{T\&S}$ ; y (iii) asignar un proporcional de esas emisiones a cada subsistema partiendo de los  $w_{\alpha,2022}$ , actualizados con un peso relativo que da idea del nivel de actividad de cada subsistema  $\alpha$  para el día de cálculo  $d$  con respecto al promedio diario de actividad de dicho subsistema para el año de referencia, y normalizándolos. Para estos valores relativos por subsistema, se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

- Regasificación diaria de gas natural (GWh/d), por planta. Dato utilizado para plantas de RG, gasoductos y estaciones de compresión.
- Actividad en conexiones internacionales (GWh/d). Dato utilizado para gasoductos y estaciones de compresión.
- Existencia y movimientos de entrada y salida en almacenamientos subterráneos (GWh/d). Dato utilizado para almacenamiento.

A partir de esto, los factores de peso diario se estimaron a partir de las siguientes expresiones:

(4)

$$w_{rg,d,i} = w_{rg,2022,i} \cdot \frac{rg_{d,i}}{\overline{rg}_{2022,i}}$$

Donde  $w_{rg,d,i}$  corresponde al peso relativo de la actividad de regasificación ocurrida en la planta  $i$  el día  $d$ ,  $w_{rg,2022,i}$  es el peso relativo de la actividad de regasificación en dicha planta para el año de referencia,  $\overline{rg}_{2022}$  corresponde al promedio diario de regasificación en dicha planta para el año de referencia, y  $rg_d$  a la actividad de regasificación en dicha planta el día  $d$ , ambos parámetros en (Gwh/d).

Tanto para las estaciones de compresión como para los gasoductos, los pesos relativos diarios ( $w_{cs,d}$ ,  $w_{p,d}$ ) son estimados a partir de la actividad diaria de las redes de transmisión. Para esto, se han considerado tanto el total de regasificación  $rg_d$  (Gwh/d) del día  $d$  en España, como también los flujos en las conexiones internacionales  $ic_d$  (Gwh/d), comparándolos con los correspondientes promedios diarios de dichas variables  $\overline{rg}_{2022}$  y  $\overline{ic}_{2022}$ , en el año de referencia, tal como se muestra a continuación:

(5)

$$w_{p,d} = w_{p,2022} \cdot \frac{(rg + ic)_d}{(\overline{rg} + \overline{ic})_{2022}}, \quad w_{cs,d,j} = w_{cs,2022,j} \cdot \frac{(rg + ic)_d}{(\overline{rg} + \overline{ic})_{2022}}$$

Donde  $w_{cs,d,j}$  corresponde al peso relativo de cada estación de compresión  $j$  para el día  $d$ , considerando una distribución homogénea de la actividad para todas las estaciones de compresión de la red.

Para los almacenamientos subterráneos, el factor de peso del año de referencia  $w_{us,2022}$  se reparte entre las  $k$  instalaciones del país, pesándolo con la capacidad de almacenamiento de cada una. A continuación, para obtener el peso relativo de cada almacenamiento subterráneo  $k$  para un día  $d$  se tienen en cuenta los movimientos de flujos  $mov_{dk}$  de dicho día, comparados con el promedio de los movimientos diarios del año de referencia  $mov_{2022,k}$ , tal como se describe en la Ecuación (6). Estos movimientos consisten en la suma de los flujos que se inyectan diariamente  $in_{d,k}$ , y los que se extraen de los almacenamientos subterráneos  $ex_{d,k}$ , reportados por Enagás [28], como se muestra en la Ecuación (7).

(6)

$$w_{us,d,k} = w_{us,2022,k} \cdot \frac{mov_{dk}}{\overline{mov}_{2022,k}}$$

(7)

$$mov_{dk} = |in_{dk}| + |ex_{dk}|$$

Por último, se realiza una normalización de todos los factores de peso asociados a las actividades de T&S, de la siguiente manera:

(8)

$$w'_{\alpha,d,f} = \frac{w_{\alpha,d,f}}{\sum_{\alpha} \sum_f w_d}$$

Donde  $\alpha$  corresponde al subsistema ( $rg$ ,  $p$ ,  $cs$ , or  $us$ ),  $d$  es el día, y  $f$  corresponde a cada instalación dentro de cada subsistema ( $i$  para  $rg$ ,  $j$  para  $cs$ , y  $k$  para  $us$ ).

A partir de esto, las emisiones correspondientes al subsistema  $\alpha$ , y a la instalación  $f$  para el día  $d$  se calculan de la siguiente manera, obteniendo el total de las emisiones de esta actividad a partir de la suma de todos los subsistemas:

(9)

$$E_{\alpha,d_f} = AD_{T\&S,d} \cdot IEF_{T\&S} \cdot w'_{\alpha,d_f}$$

(10)

$$E_{T\&S,d} = AD_{T\&S,d} \cdot IEF_{T\&S} \cdot (w'_{rg,d} + w'_{p,d} + w'_{cs,d} + w'_{us,d})$$

Todos los datos de actividad utilizados en esta sección son actualizados diariamente por Enagás [27], y se ha implementado en PHENOMENA un sistema de descarga automática de los mismos.

Una vez estimadas las emisiones diarias, PHENOMENA procede a distribuir las espacialmente utilizando los siguientes proxies espaciales y criterios:

- Plantas de regasificación: las emisiones se distribuyen sobre shapefiles de polígonos correspondientes al predio de cada planta, pesadas por la producción diaria de cada una.
- Gasoductos: las emisiones se distribuyen de manera homogénea sobre shapefiles de líneas de la red de gasoductos de todo el país.
- Estaciones de compresión: las emisiones se distribuyen de manera homogénea sobre shapefiles de polígonos correspondientes al predio de cada estación de compresión.
- Almacenamientos subterráneos: las emisiones se distribuyen sobre shapefiles de polígonos correspondientes los almacenamientos, pesadas por la capacidad de cada uno.

## 2.3.2 Distribución

Las emisiones provenientes de los Sistemas de Distribución de gas natural incluyen las fugas de CH<sub>4</sub> por permeación de materiales en las redes de distribución, por pérdida de estanqueidad en conexiones, grietas, juntas, uniones defectuosas, etc., y las emisiones de CH<sub>4</sub> operacionales o incidentales ocurridas por venteo. Estos sistemas incluyen las redes de distribución y las instalaciones receptoras a nivel de usuarios finales como el sector eléctrico (en adelante *elec*), y el sector convencional, que a su vez se subdivide en usos industriales (*ind*) y uso doméstico, comercial y de PyMEs (en adelante *r+c*).

Para la estimación de estas emisiones, el SEIE aplica una metodología específica desarrollada a nivel nacional y basada en eventos, contabilizando la cantidad de gas fugado o venteado en las redes de distribución e instalaciones receptoras. En el marco de este proyecto, y de manera similar a lo realizado para la categoría de T&S, se decidió estimar las emisiones combinando datos de actividad y el factor de emisión implícito ( $IEF_D$ ) que surge de las emisiones reportadas para el 2022 bajo la subcategoría de *Distribución* 1B2b5 (CRF). A su vez, se incorporó un factor de ajuste que busca actualizar para cada día  $d$  el valor del  $IEF_{D,d}$  en función de la intensidad relativa  $i_\beta$  de las emisiones por grupo de usuarios finales  $\beta$  (*ind*, *elec*, *r+c*), asignada a partir del análisis de series históricas de resultados oficiales del sector. Para ello, se creó un factor de emisión auxiliar ( $EF_{aux}$ ) como una función de la

intensidad de emisiones  $i_\beta$  y de la proporción de la demanda promedio por parte de cada grupo de usuarios finales en el año de referencia ( $\% \beta_{2022}$ ):

(11)

$$EF_{aux} = \frac{IEF_D}{i_{r+c} \cdot \%r + c_{2022} + i_{ind} \cdot \%ind_{2022} + i_{elec} \cdot \%elec_{2022}}$$

A partir de esto, se estiman las emisiones diarias provenientes de la distribución de gas natural por grupo de usuarios finales  $E_{\beta,d}$  de la siguiente manera:

(12)

$$E_{\beta,d} = EF_\beta \cdot AD_{\beta,d}, \quad EF_\beta = i_\beta \cdot EF_{aux}$$

Donde  $AD_{\beta,d}$  corresponde al dato de actividad del grupo de usuarios  $\beta$  el día  $d$ , a saber: la demanda de gas natural reportada diariamente por Enagás [27] por parte del sector eléctrico ( $AD_{elec,d}$ ); y la demanda diaria de gas natural por parte del sector convencional, que incluye usuarios industriales y residenciales de manera agregada, que son luego desagregados en  $AD_{ind,d}$  y  $AD_{r+c,d}$  a partir de la proporción correspondiente a cada uno en el acumulado mensual de la demanda reportada en los informes mensuales Enagás [26] (latencia de hasta 1,5 meses).

A partir de todo esto, se estiman las emisiones fugitivas diarias de  $CH_4$  provenientes de los sistemas de distribución de gas natural de la siguiente manera:

(13)

$$E_{D,d} = E_{r+c,d} + E_{ind,d} + E_{elec,d} = IEF_D \cdot (AD_{r+c,d} + AD_{ind,d} + AD_{elec,d})$$

Una vez estimadas las emisiones, PHENOMENA procede a distribuir las espacialmente utilizando los siguientes proxies espaciales y criterios:

- **Usuario sector eléctrico:** las emisiones se distribuyen sobre shapefiles de polígonos correspondientes al predio de cada central térmica que emplee gas natural, pesadas por la generación eléctrica diaria de cada una.
- **Usuarios industriales:** las emisiones se distribuyen de manera homogénea sobre un ráster de usos de suelo industrial [29].
- **Usuarios residenciales:** las emisiones se distribuyen sobre un ráster de población conectada a la red de gas natural, pesadas de acuerdo a la densidad de población.

## 2.4 Quema abierta de biomasa

Para este sector se trabaja directamente con los datos de emisiones proporcionados por el Global Fire Assimilation System versión 1.4.2 (GFASv1.4.2) [30], operado por el Servicio de Monitoreo de la Atmósfera de Copernicus (CAMS) de la Unión Europea. El sistema operacional GFASv1.4.2 ofrece estimaciones de flujos de emisión a nivel horario con una resolución espacial de  $0,1^\circ$  en archivos netCDF [31]. PHENOMENA realiza una descarga de estos datos diarios y, una vez procesadas todas las horas disponibles, calcula la media diaria de dichos flujos, adapta el sistema de coordenadas al utilizado por PHENOMENA (longitudes al rango de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ ) y recorta el dominio haciéndolo coincidir con los dominios definidos en la sección 1. A continuación, se utiliza la biblioteca NES ([NetCDF for Earth Science](#)) [32] para obtener el área correspondiente a cada celda, que es luego combinada con los valores de flujos para obtener finalmente las emisiones asociadas a

cada celda original. Por último, se realiza un downscaling desde la malla de GFAS a la malla de PHENOMENA (0,01°) utilizando los centroides de cada celda de la malla original y asignándolos la celda correspondiente de la malla más fina.

Con el objetivo de mantener consistencia con las fuentes de emisión reportadas en los inventarios oficiales y, por lo tanto, en la sección de [Emisiones Anuales](#) de este portal web, en esta sección las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de la quema de biomasa son tratadas de manera diferente a las emisiones de CH<sub>4</sub>. Las emisiones de CO<sub>2</sub> no se incluyen en las emisiones totales, pero sí se muestran en el portal web a fines informativos para el usuario. A su vez, se da la posibilidad de seleccionar dicho sector y visualizar la suma de las emisiones al resto de los sectores seleccionados. De todos modos, vale la pena mencionar que las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes de otros combustibles de origen biogénico, no están incluidas en las versiones actuales de los inventarios de emisiones anuales y diarias. Por otro lado, las emisiones de CH<sub>4</sub> provenientes de las quemas abiertas de biomasa, como así también las provenientes de combustibles biogénicos, sí están incluidas en ambas secciones del portal.

## 2.5 Transporte por carreteras

Las emisiones provenientes del transporte rodado por carretera son estimadas a partir de las pautas de conducción interurbana y rural (6.1 en la Tabla 1), y de la urbana (6.2). La metodología implementada para cada una de estas dos componentes se describe a continuación, mientras que las emisiones totales reportadas en el portal web a nivel diario y a nivel de grilla corresponden a la suma de éstas, para cada uno de los subsectores definidos: vehículos Ligeros, Pesados, y Motocicletas.

### 2.5.1 Transporte interurbano

Esta metodología combina información de alta resolución temporal de conteos de tráfico en carreteras interurbanas y rurales de la Red de Carreteras del Estado [33], desagregada por tipo de vehículo (pesados, livianos y motocicletas), con factores de emisión implícitos derivados de las emisiones del inventario oficial de emisiones de GEI del 2023 [3]. Los datos de conteos han sido vinculados a los tramos correspondientes dentro de un shapefile de carreteras de todo el país, desarrollado ad hoc para HERMES\_Δ [4]. A partir del producto entre los datos de conteos  $veh_{d,s,v}$  totales de tráfico del día  $d$  para el segmento  $s$  y tipo de vehículo  $v$ , y la longitud de dicho segmento  $l_s$ , se calcula la variable  $VKT_{d,s,v}$  (del inglés Vehicle Kilometers Travelled) asociada al segmento a nivel diario para ese tipo de vehículo:

(14)

$$VKT_{d,s,v} = veh_{d,s,v} \cdot l_s$$

A su vez, se desarrolló una metodología para cubrir faltantes de información en términos de (i) días u horarios sin conteos en un determinado tramo, (ii) tramos sin conteos de tráfico disponibles, y (iii) carreteras sin cobertura de conteos de la RCE. Dicha metodología toma como base el mapa jerárquico de carreteras elaborado en el marco del HERMES\_Δ [4], que incluye la información del Tráfico Medio Diario Anual (AADT) de cada segmento de carretera del territorio español, por tipo de vehículo, para el 2023. Para aquellos tramos para los que, en un día  $d$ , no se cuente con datos de conteos de tráfico, se replica el

comportamiento relativo de todos los segmentos con datos para tal día pertenecientes a la provincia (ESxxx), Comunidad Autónoma (ESxx) o el territorio español (ES), dependiendo de la disponibilidad de datos. Este paso se logra aplicando un factor de peso al valor medio diario del VKT de dicho segmento  $s$  y tipo de vehículo  $v$  del año de referencia 2023 ( $VKT_{v,s,2023}$ ), basado en el cambio de la actividad relativa del día  $d$  del año actual respecto a la media diaria del 2023, de todos los tramos de carretera con disponibilidad de datos ( $VKT_{d,s,v}|^{DA}$ ,  $VKT_{v,s,2023}|^{DA}$ ) dentro de la delimitación geográfica más pertinente (ver Figura 5).

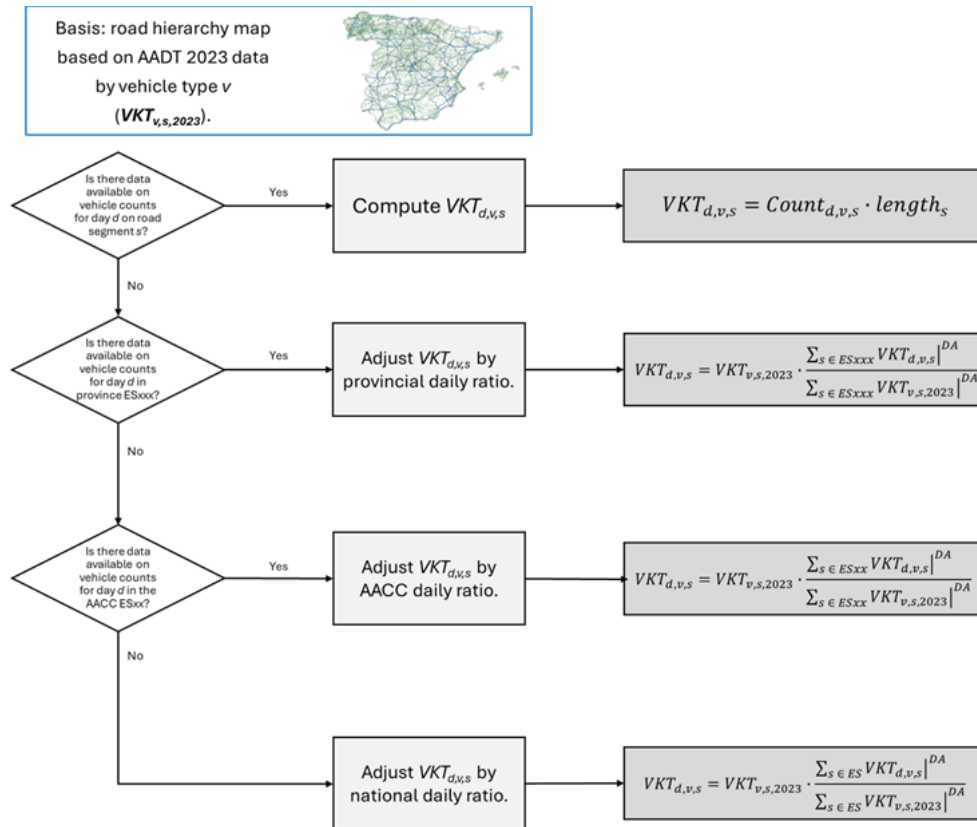


Figura 5: Esquema metodológico para la estimación de emisiones del transporte interurbano y rural, a nivel grilla.

A partir de esto, se calculan las emisiones diarias de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> asociadas al segmento  $s$  y tipo de vehículo  $v$  ( $E_{d,v,s}$ ), combinando el  $VKT_{d,v,s}$  correspondiente y el factor de emisión derivado del inventario oficial de emisiones de GEI del 2023 para la Comunidad Autónoma a la que pertenece el segmento ( $IEF_{v,ESxx,2023}$ ):

(15)

$$E_{d,s,v} = VKT_{d,s,v} \cdot IEF_{v,ESxx,2023}$$

De esta manera, quedan definidos el aspecto espacial y el aspecto temporal para la componente interurbana y rural de este sector, para el que PHENOMENA genera emisiones diarias correspondientes a cada tramo de carretera y luego las asigna a las celdas correspondientes de una grilla de 1km x 1km.

## 2.5.2 Transporte urbano

Para la pauta de conducción urbana se toman como base las emisiones anuales del SEIE 2023, distribuidas espacialmente en una grilla de 1 km × 1 km con HERMES\_Δ por tipo de vehículo  $v$ . Las emisiones  $E_{(x,y),d,v}$  asociadas a la celda  $a(x, y)$  de una grilla de 1km x 1km correspondientes al día  $d$  y al tipo de vehículo  $v$ , son estimadas a partir de las emisiones promedio diarias del 2023  $E_{(x,y),v,diarias}|^{2023}$  producidas por HERMES\_Δ [4] para dicha celda y tipo de vehículo. A continuación, se aplica un factor de peso a dichas emisiones de acuerdo a la actividad ocurrida ese día  $d$  en el centro urbano  $u$  al que pertenece la celda  $(x,y)$ , con relación a la actividad promedio diaria de la misma celda para el año 2023. Este factor se basa en la variable “*viajes-km*” publicada por el Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible dentro del proyecto Open Movilidad Data [34]. Esta variable es un indicador de la distancia total recorrida por las personas en sus desplazamientos, calculada como la suma de los kilómetros de todos los viajes realizados en un territorio durante un periodo determinado. En el marco de este trabajo, se han seleccionado los *viajes-km* con un mismo centro urbano  $u$  como origen y destino, como proxy de los movimientos de tráfico dentro de cada urbe. Para su control, se ha comparado el comportamiento de esta variable dentro de la ciudad de Madrid contra los datos de conteos de tráfico publicados en Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid [35], encontrando una muy alta correlación tanto para los perfiles semanales y mensuales, como para la variabilidad interanual. A partir de esto, las emisiones  $E_{(x,y),d,v}$  se estiman a partir de la siguiente expresión:

(16)

$$E_{(x,y),v,d} = E_{(x,y),v,diarias}|^{2023} \cdot \frac{viajes\_km_{u,d}}{viajes\_km_{u,diarias}|^{2023}}$$

donde  $viajes\_km_{u,d}$  es la suma de los valores de la variable “*viajes-km*” para el día  $d$  dentro del centro urbano  $u$ , y  $viajes\_km_{u,diarias}|^{2023}$  corresponde al promedio de los totales diarios de la variable “*viajes-km*” para cada centro urbano  $u$  en el 2023.

Por último, para aquellos municipios para los que Open Movilidad Data no dispone de datos públicos, se replica el comportamiento de la ciudad con el tamaño de población más similar dentro de la misma provincia, Comunidad Autónoma, o el territorio español, dependiendo de la disponibilidad de datos (ver Figura 6).

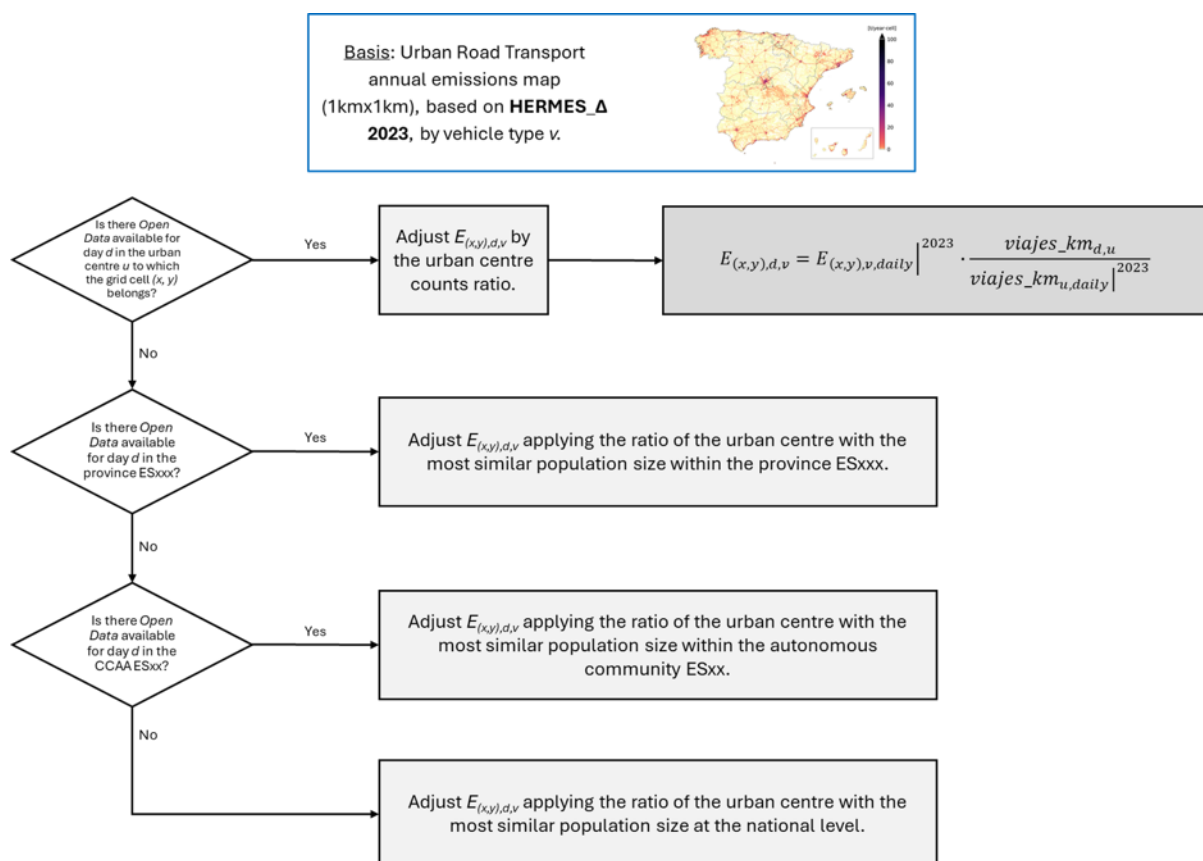


Figura 6: Esquema metodológico para la estimación de emisiones del transporte urbano a nivel grilla.

De esta manera, quedan definidos el aspecto espacial y el aspecto temporal para la componente urbana de este sector, generando emisiones diarias correspondientes a cada celda de una grilla de 1km x 1km sobre todo el territorio español.

Finalmente, PHENOMENA integra las emisiones provenientes de la pauta de conducción urbana con las de interurbana y rural, para dar lugar a mapas de emisiones diarias del transporte rodado por carreteras en alta resolución espacial, por tipo de vehículo.

## 2.6 Transporte marítimo

Se ha desarrollado e implementado una metodología para estimar las emisiones provenientes del transporte marítimo a nivel de barco, utilizando el Sistema de Identificación Automática (AIS). AIS es un sistema que proporciona información de identificación y posicionamiento (latitud, longitud) de las embarcaciones con alta resolución espacial y temporal, a través de señales de radio que pueden ser captadas tanto por estaciones costeras como por satélites, permitiendo una cobertura global.

PHENOMENA descarga diariamente datos AIS de alta resolución temporal a través de Kpler AIS shipping data [36] (adquiridos para este proyecto), para los dominios de la Península Ibérica e Islas Baleares, y el de las Islas Canarias, cubriendo la totalidad de la zona económica exclusiva de España (ver “EEZ áreas” en la Figura 2), con una mínima latencia (un día). Como parte del preprocesamiento y puesta a punto de datos, se ha desarrollado un algoritmo montado sobre un Sistema de Información Geográfica capaz de

mapear las rutas tomadas por los barcos. Este algoritmo construye trayectos uniendo los puntos de mensajes AIS consecutivos. A continuación, PHENOMENA ejecuta un método sencillo para calcular la energía consumida en cada ruta, tanto para los motores principales como auxiliares, basado en la combinación de: (i) datos AIS de posición y velocidad instantánea; (ii) información técnica de cada embarcación adquirida a través de S&P Global [37], tal como sus dimensiones, tipo de nave y potencia instalada; y (iii) tipo de maniobra de navegación en ejecución (barcos amarrados, en maniobra, o en navegación), a partir de la siguiente expresión general:

(17)

$$Ene_{o,s} = \Delta t_{o,s} \cdot (EL_{main} \cdot P_{main} + EL_{aux} \cdot P_{aux})_{o,s}$$

donde  $Ene_{o,s}$  es la energía total asociada a la operación  $o$  de la embarcación  $s$ ,  $\Delta t_{o,s}$  es el tiempo que le lleva a la embarcación  $s$  completar la operación  $o$ , mientras que  $EL$  y  $P$  corresponden a la carga y a la potencia, respectivamente, de los motores principales (*main*) y auxiliares (*aux*) para dicho tipo de operación.

La carga de los motores principales  $EL_{main}$  cuando la embarcación se encuentra bajo un régimen de operación de maniobra o de navegación, se calcula de la siguiente manera:

(18)

$$EL_{main,o,s} = \left( \frac{S_{o,s}}{S_{serv,s}} \right)^3$$

Donde  $S_{o,s}$  es la velocidad instantánea de la embarcación  $s$  bajo la operación  $o$ , y  $S_{serv,s}$  es la velocidad de servicio, reportada en la información técnica del barco.

Cuando la embarcación se encuentra amarrada, se asume que los motores principales no se encuentran en uso, con lo cual la variable  $EL_{main}$  se anula. Para determinar la carga de los motores auxiliares  $EL_{aux}$ , se asumen porcentajes de uso de la potencia total auxiliar instalada según la fase operacional  $o$  de la embarcación [38].

Tanto los datos de potencia de los motores principales  $P_{main}$  como la de los motores auxiliares  $P_{aux}$ , son datos técnicos de cada embarcación, disponibles en la documentación de S&P Global [37].

Para aquellos barcos (identificados por el código único IMO) para los que no se dispone de información completa en las tablas de información técnica adquirida, se aplica una metodología de relleno de datos basada en asignar las características (principalmente la potencia del motor) del barco más similar en términos de tamaño y tipo de barco, siguiendo lo propuesto en el trabajo de Johansson et al. [39]. Por último, para aquellas señales AIS sin IMO asociado o que no se encuentran en la tabla de datos técnicos, se utiliza el modelo MoSES, ampliamente reconocido a nivel internacional, que permite estimar características técnicas a partir del tipo de nave [40].

A partir de la energía consumida, PHENOMENA estima las emisiones asociadas a cada trayecto de cada embarcación, aplicando factores de emisión específicos para  $CO_2$  y  $CH_4$  asociados a cada tipo de combustible y a tipo de maniobra. Para el  $CO_2$  se emplean factores derivados del contenido de carbono del combustible, mientras que para  $CH_4$  se utilizan valores dependientes del tipo de motor y su nivel de carga, siguiendo también las recomendaciones del Cuarto Estudio de la Organización Marítima Internacional sobre los

Gases de Efecto Invernadero [38], complementadas con trabajos posteriores como el de Kuittinen et al [41]. En esta sección de Emisiones Diarias sólo se estiman las emisiones asociadas a fugas de metano no quemado (methane slip) de los motores de gas natural licuado (GNL), y por lo tanto no se incluyen las emisiones evaporativas de CH<sub>4</sub> ni las asociadas a carga y descarga de GNL en terminales portuarias de regasificación con inyección a red.

Para este sector se cuenta con información de muy baja latencia (1 día) y muy alta resolución temporal (a nivel de minutos) para la totalidad de la zona económica exclusiva de España. Por tal motivo, PHENOMENA estima emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> a partir de un enfoque *bottom-up* para luego agregarlas a nivel diario y a nivel de celda. Dado que para este sector se cuenta con información localizada de las fuentes de emisión, las emisiones son estimadas con una muy alta resolución espacial y son luego asignadas a la celda correspondiente en una grilla de 1km x 1km para cada uno de los dominios definidos anteriormente.

Para las divisiones regionales NUTS2 (CCAA) y las Regiones Metropolitanas, las emisiones del transporte marítimo reportadas para cada región son las que ocurren dentro de los dominios de las zonas de servicio de cada uno de los puertos del país, definidos en la sección 1.

## 2.7 Aviación

Se ha desarrollado una metodología para estimar las emisiones provenientes del consumo de combustibles utilizados en el Ciclo de Aterrizaje y Despegue (CAD) de vuelos domésticos e internacionales con partida o arribo en aeropuertos del territorio español. El ciclo CAD es definido por la Organización de Aviación Civil Internacional (ICAO) [42] como las operaciones realizadas por una aeronave por debajo de los 3.000 pies de altitud sobre la elevación del aeropuerto. Se incluyen entonces, para los vuelos de salida, las fases de: taxi, rodaje de salida, despegue y ascenso inicial, y para los vuelos de llegada, las fases de aproximación, aterrizaje, rodaje de llegada y taxi.

Para obtener información sobre la actividad de cada aeronave durante los ciclos CAD, se utilizan señales ADS-B (Automatic Dependent Surveillance–Broadcast). Las señales ADS-B se transmiten periódicamente por los sistemas de a bordo de las aeronaves y permiten un seguimiento continuo de los vuelos. Contienen información de alta resolución temporal y espacial, incluyendo el número de identificador único de cada aeronave, el número de vuelo, su posición geográfica (latitud y longitud), su altitud barométrica y velocidad.

PHENOMENA descarga diariamente datos ADS-B de alta resolución temporal a través de Spire Aviation [43]. Las señales cubren los dominios de la Península Ibérica y de las Islas Canarias, abarcando la totalidad de las Regiones de Información de Vuelo españolas definidas en la sección 1 (ver Figura 2), con una latencia de un día. Como parte del preprocesamiento y puesta a punto de los datos, se ha desarrollado un algoritmo basado en un Sistema de Información Geográfica capaz de reconstruir las trayectorias de las aeronaves y el tiempo transcurrido  $\Delta t$  en cada una de las distintas fases del ciclo CAD. A partir de esto, y de las características técnicas de cada aeronave, que incluyen tipo y número de motores, se obtiene el combustible consumido, y con ello las emisiones  $E_{\rho,f}$  provenientes de cada una de las fases  $\rho$  de cada vuelo  $f$ .

(19)

$$E_{\rho,f} = \Delta t_{\rho,f} \cdot \dot{m}_{\rho,e} \cdot N_e^o \cdot EF_i$$

Donde  $\dot{m}_{\rho,e}$  es la tasa de consumo de combustible del motor  $e$  cuando opera según la fase de vuelo  $\rho$ ,  $N_e^o$  es el número de motores involucrados en la operación, y  $EF_i$  es el factor de emisión de cada especie asociado al tipo de combustible  $i$  consumido en el vuelo.

La información técnica de las aeronaves se obtuvo del EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook [44], y fue complementada con documentación técnica pública de los fabricantes de aeronaves. Los factores de emisión de CO<sub>2-ff</sub> y CH<sub>4</sub> fueron tomados del SEIE [45], que brinda información sobre los factores de emisión implícitos derivados del modelo FEIS (The Fuel Burn and Emissions Inventory System Procedure), desarrollado por EUROCONTROL (Organización Europea para la Seguridad de la Navegación Aérea) [46].

Para aquellos vuelos para los que no se dispone de señales ADS-B suficientes para reconstruir la totalidad del ciclo CAD, PHENOMENA estima las fases faltantes utilizando capas geográficas de los aeropuertos españoles del Servicio de Información Aeronáutica de ENAIRE [47], incluyendo pistas, calles de rodaje y plataformas. Cuando no hay suficientes señales ADS-B disponibles para aplicar este procedimiento, los tiempos de las fases CAD faltantes se asignan utilizando los valores promedio propuestos por el EMEP/EEA [44].

Para este sector se cuenta con información de muy baja latencia (1 día) y muy alta resolución temporal (a nivel de minutos) para la totalidad de las Regiones de Información de Vuelo de España. Por tal motivo, PHENOMENA estima emisiones de CO<sub>2</sub> a partir de un enfoque bottom-up para luego agregarlas a nivel diario y a nivel de celda. Dado que para este sector se cuenta con información localizada de las fuentes de emisión, las emisiones son estimadas con una muy alta resolución espacial y son luego asignadas a la celda correspondiente en una grilla de 1km x 1km.

Para las divisiones regionales NUTS2 (CCAA) y las Regiones Metropolitanas, las emisiones de aviación son asignadas al aeropuerto al que corresponda la fase del ciclo CAD contemplada, y de esta manera, a cada región agregada.

## Referencias

- [1] O. García, N. Taquet, E. Sepúlveda, R. Ramos, and C. Torres, "COCCON-Spain: Toward an Integrated Greenhouse Gas Observation System in Spain," 2024.
- [2] C. Tena, J. Gehlen, L. Rizza, and M. Guevara, "HERMES\_Delta v1.0.1," 2026. doi: <https://doi.org/10.82201/5DVMYR>.
- [3] MITECO, "Documento Nacional de Inventario de gases de efecto invernadero (1990-2023)," Madrid, Spain, 2025. Accessed: Dec. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.miteco.gob.es/en/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-.html>
- [4] P. Castesana *et al.*, "A National Emission System to Support Air Quality Modelling and Greenhouse Gases Monitoring Efforts in Spain," in *Air Pollution Modeling and Its Application XXX*, C. Mensink and U. Im, Eds., Cham, Switzerland: Springer Proceedings in Complexity, 2026, pp. 195–203. doi: 10.1007/978-3-032-02971-3\_25.
- [5] C. Piñero-Megías *et al.*, "PHENOMENA (sPanish EmissioN mOnitoring systeM for grEeNhouse gAses)," 2026. doi: <https://doi.org/10.82201/24AKTH>.
- [6] Transportes, "Listado de áreas urbanas por municipios," 2018.

- [7] B. Sanz Berzal and A. García Ballesteros, *Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI imagen socioeconómica de una región receptora de inmigrantes*. Publicaciones de Economía de la Comunidad de Madrid, 2002.
- [8] BOE, “BOE-A-2011-16467. Real Decreto Legislativo 2/2011: Texto Refundido de la Ley de Puertos del Estado y de la Marina Mercante,” 2011. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.boe.es/eli/es/rdlg/2011/09/05/2>
- [9] ENTSO-E, “European Network of Transmission System Operators for Electricity (ENTSO-E). Actual Generation per Production Type – Spain.” Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>
- [10] REE, “Red Eléctrica Española: datos de generación.” Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://www.ree.es/es/datos/generacion>
- [11] IPCC, *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Japan: IGES, 2006.
- [12] MITECO, “2025-SPAIN-NECD-LPS data: 2025 official submission of Spain under NEC Directive 2016/2284 obligations for Large point sources (LPS) emission data for reported years 1990-2023,” 2025. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: [https://cdr.eionet.europa.eu/es/eu/nec\\_revised/lps/envabhxyzw/](https://cdr.eionet.europa.eu/es/eu/nec_revised/lps/envabhxyzw/)
- [13] MITECO, “Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (PRTR-España),” 2025. Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://prtr-es.miteco.gob.es/>
- [14] Worldsteel, “World Steel Association.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://worldsteel.org/>
- [15] UNESID, “Unión de Empresas Siderúrgicas (UNESID). Plantas de producción y transformación de acero en España.” Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://unesid.org/produccion-de-acero/>
- [16] ArcelorMittal, “ArcelorMittal Asturias – Gijón.” Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://spain.arcelormittal.com/que-hacemos/productos-largos/gijon/>
- [17] GEM, “Global Energy Monitor: Providing open and reliable energy data.” Accessed: Jun. 23, 2026. [Online]. Available: <https://globalenergymonitor.org/>
- [18] MINTUR, “Estadística del Cemento,” 2006. Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://industria.gob.es/es-es/estadisticas/paginas/estadistica-cemento.aspx>
- [19] Oficemen, “Agrupación de fabricantes de cemento de España.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.oficemen.com/>
- [20] Climate Trace, “Climate Trace: Comprehensive Emissions Insight.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://climatetrace.org/>
- [21] MITECO, “Sistema Español de Inventario de Emisiones. Metodologías de estimación de emisiones. Energía en Industria: Fabricación de cemento (combustión),” 2026. Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/030311-combust-fabric-cemento\\_tcm30-430164.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei/030311-combust-fabric-cemento_tcm30-430164.pdf)
- [22] ERA5-land, “Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store: ERA5-land post-processed daily-statistics from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).” Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/derived-era5-land-daily-statistics?tab=overview>
- [23] IDAE/MITECO, “Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.idae.es/>
- [24] NaTran, “NaTran Vigilance Outlook.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://smart.natransgroupe.com/en>
- [25] Enagás, “Enagás S.A.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.enagas.es/en/>
- [26] Enagás, “Demanda de gas. Gestión Técnica del Sistema, Publicaciones GTS, Enagás.” Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.enagas.es/es/gestion-tecnica-sistema/energy->

- data/publicaciones/demanda-gas/?category=enagas:demanda-de-gas/informe-mensual&month=&year=#undefined
- [27] Enagás, “Capacidades técnicas y flujos físicos: seguimiento diario del Sistema. Gestión Técnica del Sistema, Parámetros físicos, Enagás.” Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.enagas.es/es/gestion-tecnica-sistema/energy-data/parametros-fisicos/capacidades-tecnicas-flujos-fisicos/seguimiento-diario-sistema/>
  - [28] Enagás, “Información diaria e histórica de almacenamientos subterráneos.” Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.enagas.es/es/transicion-energetica/red-gasista/infraestructuras-gasistas/almacenamientos-subterraneos/informacion-diaria-historica/>
  - [29] CLMS, “Copernicus Land Monitoring Service. CORINE Land Cover inventory.” Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover/clc2018>
  - [30] J. W. Kaiser *et al.*, “Biomass burning emissions estimated with a global fire assimilation system based on observed fire radiative power,” *Biogeosciences*, vol. 9, no. 1, pp. 527–554, 2012, doi: 10.5194/bg-9-527-2012.
  - [31] CAMS/ECMWF, “CAMS global biomass burning emissions based on fire radiative power (GFAS): data documentation,” 2026. Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/CAMS+global+biomass+burning+emissions+based+on+fire+radiative+power+%28GFAS%29%3A+data+documentation>
  - [32] C. Tena, A. Vilanova, and C. Piñero, “NES (NetCDF for Earth Science),” 2026. Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://pypi.org/project/NES/>
  - [33] RCE, “Tráfico en las estaciones de aforo de la Red de Carreteras del Estado (RCE): estaciones permanentes,” 2025. Accessed: Jun. 11, 2026. [Online]. Available: <https://www.transportes.gob.es>
  - [34] OMD, “Open Movilidad Data: estudio de la movilidad con Big Data,” 2026. Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.transportes.gob.es/ministerio/proyectos-singulares/estudios-de-movilidad-con-big-data/opendata-movilidad>
  - [35] PDAM, “Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid: datos del tráfico en tiempo real,” 2026. Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://datos.madrid.es/dataset/202087-0-traffic-intensidad>
  - [36] Kpler, “Ship tracking with Kpler Automatic Identification System (AIS) data.” Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.kpler.com/product/maritime/kplerais>
  - [37] S&P Global, “Maritime & Trade: Ship and Port Data.” Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/solutions/ship-and-port-data>
  - [38] IMO, “Fourth IMO GHG Study 2020 Full Report,” 2020.
  - [39] L. Johansson, J.-P. Jalkanen, and J. Kukkonen, “Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution,” *Atmos. Environ.*, vol. 167, pp. 403–415, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.042>.
  - [40] D. A. Schwarzkopf, R. Petrik, V. Matthias, M. Quante, E. Majamäki, and J.-P. Jalkanen, “A ship emission modeling system with scenario capabilities,” *Atmos. Environ. X*, vol. 12, p. 100132, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2021.100132>.
  - [41] N. Kuittinen, M. Heikkilä, and K. Lehtoranta, “Review of methane slip from LNG marine engines,” 2023.
  - [42] ICAO, “International Civil Aviation Organization.” Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.icao.int/>
  - [43] Spire, “Spire Aviation Data.” Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://spire.com/aviation/>
  - [44] EMEP/EEA, “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023,” 2023. Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>
  - [45] MITECO, “Sistema Español de Inventario de Emisiones. Metodologías de estimación de emisiones. Transporte aéreo,” 2025. Accessed: Jun. 29, 2026. [Online]. Available: [https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/0805\\_transporte\\_aereo\\_tcm30-446885.pdf](https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/0805_transporte_aereo_tcm30-446885.pdf)

- [46] Eurocontrol, “European aviation fuel burn and emissions inventory system (FEIS) for the European Environment Agency,” 2018. Accessed: Jun. 29, 2026. [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/publication/european-aviation-fuel-burn-and-emissions-inventory-system-feis-european-environment>
- [47] ENAIRE, “Servicio de Información Aeronáutica,” 2026. Accessed: Jun. 12, 2026. [Online]. Available: <https://aip.enaire.es>