



# METANO EN EL GOLFO DE CÁDIZ

María Romero Expósito

Trabajo entregado para la obtención del grado de Máster en  
Tecnología Ambiental  
Modalidad: Investigación

Diciembre 2023

Directores:

José Antonio Adame Carnero

Isidoro Gutiérrez Álvarez



D. José Antonio Adame Carnero, DNI: 29.043.018K, investigador senior y coordinador de la Estación de Sondeos Atmosféricos de El Arenosillo, departamento de Observación de la Tierra y Ciencias del Espacio del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

D. Isidoro Gutiérrez Álvarez, DNI: 49083448, Investigador Postdoctoral en el Departamento de Ciencias Integradas, Universidad de Huelva,

### **INFORMAN:**

Que el trabajo titulado “Metano en el Golfo de Cádiz” presentado Dña. María Romero Expósito, con DNI 53586033N ha sido realizado en **la Universidad de Huelva** bajo mi dirección, y autorizo su presentación y defensa como **Trabajo Fin de Máster** (Modalidad: Trabajo de Investigación), para el Máster Universitario en Tecnología Ambiental de la Universidad de Huelva.

En Huelva, a 9 de diciembre de 2023

Fdo.: José Antonio Adame Carnero e Isidoro Gutiérrez Álvarez



## RESUMEN

El cambio climático y el calentamiento global del sistema atmosférico tienen su origen, fundamentalmente, en el incremento de las emisiones antropogénicas desde la época industrial. Concretamente, está asociado a la emisión de los conocidos como gases de efecto invernadero (GEI), siendo el segundo más relevante de entre todos estos el metano (CH<sub>4</sub>).

El patrón de concentración global del metano no mostró una evolución constante de incremento, sino que se estabilizó en la primera década del milenio, y comenzó a aumentar rápidamente al final de esta. Este comportamiento, junto a su vida media menor que la del CO<sub>2</sub>, y el mayor potencial de calentamiento relativo, lo han convertido en los últimos años en un gas de gran interés en lo que a la lucha contra el cambio climático respecta. Hasta tal punto que el estudio y control de sus emisiones ha estado apareciendo en las conferencias internacionales como estrategia necesaria para minimizar el continuo aumento de la temperatura media global.

Se trata de un gas que aun presenta incertidumbres considerables en las estimaciones en algunos casos, y una potencial problemática de futuro debido a que fenómenos como el deshielo del Ártico propiciarían una retroalimentación de las emisiones.

En este contexto se desarrolla este Trabajo de Investigación Fin de Master (TFM), cuyo objetivo ha sido conocer la evolución y tendencia del metano en una región sensible al cambio climático, como es el golfo de Cádiz, a partir del uso de inventarios de emisión globales y observaciones desde el espacio. Así, se realizó una búsqueda y descarga de ficheros procedentes del inventario de emisiones de Copernicus y de las concentraciones de metano a nivel de superficie, medidas con el instrumento AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) a bordo del satélite AQUA de la NASA.

Estos datos han sido tratados posteriormente para obtener medias mensuales, tendencias, la evolución anual y diversos datos estadísticos. Observando los resultados, ha podido llegarse a la conclusión de que el metano presenta variaciones estacionales, y, de forma más importante, que en la región puede observarse un aumento constante desde el comienzo del milenio que no concuerda con la tendencia estable (y que incluso disminuye) de emisión. Así, el metano observado en esta región no sería de origen local, sino que procedería de otras áreas. Se requerirían estudios posteriores más detallados para poder determinar el origen y evolución del metano sobre el Golfo de Cádiz.

## **ABSTRACT**

Climate change and global warming of the atmospheric system have their origin, fundamentally, in the increase in anthropogenic emissions since the industrial era. Specifically, it is associated with the emission of what are known as “Greenhouse Gases” (GHG), the second most relevant of all of these being methane (CH<sub>4</sub>).

The global methane concentration pattern did not show a constant evolution of increase, but rather, it stabilized in the first decade of the millennium and began to increase rapidly after. This behavior, when taking into account the shorter half-life that methane has in comparison with carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), and the greater relative warming potential, have made it a gas of great interest in recent years in the fight against climate change. To such an extent that the study and control of its emissions has been appearing at international conferences as a necessary strategy to minimize the continuous increase in global average temperature.

The estimation of methane levels presents considerable uncertainties in some cases, and has the potential to become a greater problem in the future due to phenomena such as the melting of the Arctic which would lead to a feedback cycle of emissions.

In this context, this master's final research project has been developed with the goal to understand the evolution of methane in a region sensitive to climate change, such as the Gulf of Cádiz, utilizing global emission inventories and observations from space. Thus, a search and download of files from the Copernicus emissions inventory and surface methane concentrations, measured with the AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) instrument aboard NASA's AQUA satellite, was carried out.

This data has been subsequently processed to obtain monthly averages, trends, and annual evolution. Observing the results, it has been possible to reach the conclusion that methane presents seasonal variations, and that in the region a constant increase can be observed since the beginning of the millennium which deviates from the stable trend of a slight decrease of emissions. Thus, the methane observed in this region would not be of a local origin but originates from other areas. Furthermore, detailed studies would be required to determine the origin and evolution of methane over the Gulf of Cádiz.



## ÍNDICE

RESUMEN .....	iii
ABSTRACT .....	iv
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL Y PAPEL QUE ESTÁ JUGANDO EL METANO EN EL CAMBIO CLIMÁTICO.....	1
1.2. CAMBIO CLIMÁTICO REGIONAL .....	4
1.3. FUENTES Y SUMIDEROS DE METANO .....	4
1.4. ÚLTIMOS TRATADOS O ACUERDOS INTERNACIONALES FIRMADOS SOBRE EL METANO .....	9
1.5. INVENTARIOS DE EMISIONES, EDGAR Y COPERNICUS .....	10
1.6. MEDIDAS DE METANO: REDES DE OBSERVACIÓN EN TIERRA E INSTRUMENTACIÓN EMBARCADA EN SATÉLITE (AIRS Y TROPOMI).....	11
1.7. LA PROBLEMÁTICA DEL GOLFO DE CÁDIZ EN CUANTO AL METANO .....	12
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
2.1. DESCRIPCIÓN DE LA REGIÓN DE ESTUDIO .....	14
2.2. INVENTARIO DE EMISIONES DE COPERNICUS.....	15
2.3. OBSERVACIONES DE METANO DESDE SATÉLITE: AIRS (ATMOSPHERIC INFRARED SOUNDER) .....	15
2.4. FUENTES DE INFORMACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS	17
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	20
3.1. EMISIONES DE METANO EN LA REGIÓN DE ESTUDIO.....	20
3.2. EVOLUCIÓN MENSUAL DEL METANO ATMOSFÉRICO SUPERFICIAL .....	22
3.3. TENDENCIA DE LAS CONCENTRACIONES Y EMISIONES DE METANO. ....	24
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES .....	29
REFERENCIAS .....	31



# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Cambio climático global y papel que está jugando el metano en el cambio climático

En la actualidad se está dando un proceso de cambio climático global que consiste en un aumento de la temperatura media en la superficie terrestre, que además está ocurriendo de forma acelerada. Un cambio climático, de forma general, se puede definir como “un cambio a largo plazo de las temperaturas y patrones climáticos” (Naciones Unidas, 2023). Este proceso tendría numerosos efectos negativos, algunos de los cuales pueden llegar a ser difíciles de predecir debido a la complejidad de los procesos que se dan dentro de los distintos sistemas que conforman el planeta Tierra, así como de las interacciones que se producen entre los mismos. A pesar de que los cambios climáticos pueden darse por causas naturales, se considera que el actual tiene como causa principal la emisión de gases de efecto invernadero (GEIs) por parte del ser humano (Reay et al., 2010). El cambio climático es, por tanto, un fenómeno que tiene gran importancia en el presente.

El efecto invernadero de la atmósfera terrestre se produce debido a que la radiación recibida del sol, de onda corta, es parcialmente reflejada por la superficie y devuelta al espacio, pero en forma de radiación de onda larga. Sin embargo, esta radiación de onda larga es parcialmente absorbida o reflejada de vuelta a la Tierra por los elementos presentes en la atmósfera. De este modo, parte de la radiación recibida por el sol queda “atrapada” dentro nuestra atmósfera (Reay et al., 2010) (Figura 1), lo que incrementa la temperatura terrestre permitiendo que la vida en la Tierra se desarrolle tal y como la conocemos.

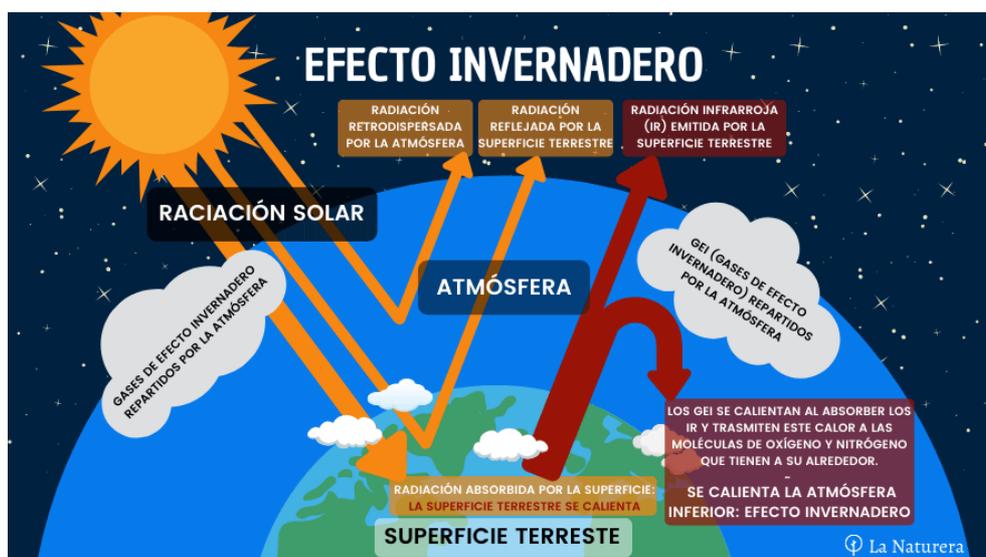


Figura 1. Representación visual del funcionamiento del efecto invernadero terrestre.

Los conocidos como gases de efecto invernadero son aquellos capaces de absorber y reemitir estas radiaciones de onda larga. Por tanto, si aumenta su proporción en la atmósfera, aumenta la cantidad de radiación que no vuelve al espacio, aumentando consecuentemente la temperatura. Los principales GEIs son el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), que son capaces de absorber y reemitir parte de la radiación infrarroja emitida por la Tierra.

Para poder reducir este fenómeno es esencial contar con datos sobre cómo los niveles de gases efecto invernadero presentes en nuestra atmósfera varían con el tiempo, y estudiarlos para entender cómo, y por qué varían. El metano es uno de estos gases, en concreto, el segundo de mayor relevancia tras el dióxido de carbono (Zhang et al., 2017). Se encuentra en menor concentración que este último en la atmósfera, pero presenta un potencial de calentamiento unas 28 veces mayor que el del CO<sub>2</sub> en un periodo de 100 años, sin considerar interacciones climáticas (Sauniois et al., 2020). Así, en la actualidad contribuye alrededor de un tercio del cambio climático global (Thakur & Solanki, 2022).

El metano presenta un tiempo de residencia atmosférico menor que el del CO<sub>2</sub>, ya que el metano tarda alrededor de 12 años en desaparecer, mientras que el CO<sub>2</sub> puede llegar a permanecer siglos (Borunda, 2021). Esto implica que una disminución y control de las emisiones de metano tendría efectos en un plazo de tiempo menor.

El metano puede afectar a las concentraciones de otros gases de efecto invernadero, como puedan ser el ozono (O<sub>3</sub>), el vapor de agua (H<sub>2</sub>O) o el dióxido de carbono. También afecta a su propio tiempo de permanencia en la atmósfera (Sauniois et al., 2020).

En lo que al origen del metano atmosférico respecta, este gas procede de fuentes tanto naturales (principalmente humedales, o sistemas acuáticos como ríos y lagos), como antropogénicas (ganadería, vertederos, industria de carbón e industria de combustibles fósiles -gas y petróleo-). Otro motivo del aumento del metano en atmósfera sería la alteración del ciclo del metano producida por el aumento de CO<sub>2</sub> en la atmósfera y el cambio climático.

Desde 1750, el metano emitido por fuentes antropogénicas es de alrededor de 366 Tg/año, y ha contribuido con un 23 % del forzamiento radiativo (0,62 Wm<sup>-2</sup>), si consideramos la concentración atmosférica. Teniendo en cuenta el efecto indirecto de las emisiones de CH<sub>4</sub> sobre el clima, en la actualidad se le atribuyen 0,97 Wm<sup>-2</sup> (Myhre et al., 2013).

La concentración de metano global en la atmósfera vio una estabilización de los niveles a principio de la década de los 2000, y un posterior aumento más acuciado que no ha cesado desde entonces (Reay et al., 2010). Actualmente las causas de este comportamiento siguen siendo motivo de controversia en la comunidad científica. En

cuanto a los motivos de la mencionada estabilización, diversos autores han propuesto diferentes teorías sobre los posibles motivos. Por ejemplo, Rice et al. (2010) indica que parte del metano habría sido atrapado por árboles sobre fuentes de agua en los humedales tropicales. Bloom et al. (2010) utilizando observaciones de satélite de metano en la columna atmosférica, mostró una clara correlación entre las concentraciones obtenidas, la temperatura superficial y el nivel freático, y estimó las emisiones globales de metano entre 2003 y 2007. De acuerdo con Christensen (2014) la estabilización podría haberse dado por una disminución de las emisiones debido a períodos de sequía en los humedales tropicales y árticos entre 1980 y 2006, junto a una disminución en las fuentes de metano antropogénicas.

Mientras que, el posterior aumento a partir del 2006 podría deberse, según algunos autores a emisiones antropogénicas del sector de los combustibles fósiles (Hausmann et al., 2016), otros lo atribuyen a un incremento de metano biogénico debido a la agricultura, lo cual sería consistente con un aumento de emisiones naturales que fueron calculadas por método bottom-up, relacionadas con este sector, y no relacionadas con los humedales naturales (Nisbet et al 2016; Schaefer et al 2016).

También podrían estar influyendo los sumideros, previamente se estimaba un aumento de OH en la atmósfera, mientras que a partir de 2006 la concentración se habría estabilizado (Dalsøren et al., 2016). Como ya se ha comentado, al principio de la década de los 2000 la concentración atmosférica global de metano se estabilizó, pero a partir de 2007 comenzó a aumentar. Así, pasó de 300-800 ppb al comienzo de la revolución industrial en 1750, a un valor de alrededor de 2,6 veces mayor en la actualidad, se estimaron 1857 ppb en 2018 (Saunio et al., 2020). En la época preindustrial se dio un aumento neto de 1 °C de la temperatura media mundial, se estima que el metano fue responsable de aproximadamente la mitad de este aumento. La concentración de este gas de efecto invernadero sigue aumentando y no se espera que esta tendencia cambie en los próximos años (Methane Matters, 2022).

Geográficamente, se da una predominancia de emisiones en los trópicos, con alrededor del 65 % del metano proveniente de latitudes mayores a 30 °N, un 30 % proviene de latitudes medias (entre 30-60 °N), y alrededor del 4 % provendría de las altas latitudes del hemisferio norte (60-90 °N) (Saunio et al., 2020).

En el futuro, será de gran relevancia entender los patrones de aumento del metano y sus causas, para poder seguir trabajando en combatir el cambio climático global.

Se puede considerar que la reducción de metano sería la estrategia más eficaz para reducir el calentamiento global a corto plazo y ajustarse a los objetivos actuales de la Cumbre del Clima (entre ellos, limitar dicho calentamiento a 1.5 °C). Sin embargo, la trayectoria del cambio climático se ajusta a algunos de los modelos del Grupo

Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (“Intergovernmental Panel on Climate Change”, IPCC) que predicen un mayor aumento de temperatura (Saunois et al., 2020), por lo que se necesitaría una reducción sustancial de este gas para cumplir dichos objetivos.

## **1.2. Cambio climático regional**

El IPCC provee de métodos para la predicción de escenarios futuros en lo que al cambio climático respecta. La Junta de Andalucía ha realizado el análisis a nivel regional de acuerdo con el 6º informe del IPCC. Con estos datos, se ha creado una página web<sup>1</sup> que permite ver cómo evolucionan las diversas variables climáticas en función del escenario que se escoja. Así como, un informe detallado que considera los efectos que tendrá el cambio climático regional sobre gran cantidad de variables.

De forma resumida, independientemente del escenario considerado, en Andalucía se obtiene un aumento generalizado de la temperatura media. Se verían más perjudicadas las regiones continentales, así como las de alta y media montaña, sobre todo Sierra Morena y Los Sistemas Béticos (Sierras de Cazorla y Segura y Sierra Nevada). Este aumento de la temperatura media produciría entre muchos otros factores: una mayor oscilación térmica, un incremento de la intensidad y cantidad de los fenómenos climatológicos extremos, una disminución de las precipitaciones sobre todo en la fachada mediterránea (aunque algunos modelos llegan a predecir incrementos en las precipitaciones globales) y el aumento consecuente del índice de desertización. Según los distintos modelos, disminuiría el número de meses con un balance hídrico positivo (Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo sostenible, 2020). Como consecuencia, las características de los distintos ecosistemas andaluces se verían modificados, y los servicios ecosistémicos que estos proveen cambiarían de forma acorde. La predicción de los efectos sobre las emisiones de metano sería compleja, ya que distintos factores quedarían entrelazados.

## **1.3. Fuentes y sumideros de metano**

Las emisiones de metano pueden clasificarse según el tipo de fuente en antropogénicos o naturales, y según el proceso del que proceden en biogénicos, termogénicos o pirogénicos.

Las emisiones de metano pueden ser calculadas mediante métodos top-down o bottom-up. En el último informe producido por Saunois M. et al. (2021) sobre metano

---

<sup>1</sup> <https://andalucia.sicma.red/clima/>. Visitado en 2023/06/25

en atmósfera, “The Global Methane Budget” (2021), los resultados a los que se llega utilizando los métodos top-down y bottom-up son distintos. Los métodos top-down estiman las emisiones de distintas fuentes a partir de la observación directa de las concentraciones de metano en la atmósfera, y los métodos bottom-up estiman las concentraciones de este gas mediante inventarios de emisión y modelos de química atmosférica, entre otras fuentes de información (Saunio et al., 2020). En la década de entre 2008 y 2017 se estiman mediante métodos top-down unas emisiones para el CH<sub>4</sub> de 576 Tg/año, esto suponen 24 Tg/año más que en el informe para la década anterior, 60% del cual provendría de fuentes antropogénicas.

Los métodos bottom-up estiman un 30% más de emisiones, pero se considera que algunas emisiones, en particular las asociadas a cuerpos de aguas interiores, se estarían sobreestimando; en la actualidad existen grandes incertidumbres a la hora de calcular emisiones de metano mediante procesos (Saunio et al., 2020).

El aumento en la concentración de metano atmosférica que se ha dado en los últimos años es atribuible al aumento de emisiones de fuentes antropogénicas (ganadería, combustibles fósiles, etc.), pero también a la alteración de los flujos de metano debido al cambio climático y al aumento de las concentraciones de CO<sub>2</sub>.

Como se acaba de comentar, los cambios en las fuentes y sumideros de metano están caracterizados por grandes incertidumbres. Destaca la incertidumbre en la pérdida de metano por radicales OH en la atmósfera (Eq. 1), proceso por el cual se estima que se pierde un 10 % del metano. Las incertidumbres alcanzan incluso el 40-60 % si nos movemos a nivel regional. Estos radicales presentan un muy corto tiempo de residencia en la atmósfera, y su distribución temporal y espacial presenta gran variabilidad, por lo que reducir estas incertidumbres requeriría de medidas de muy alta resolución. Solo es posible en la actualidad estimar OH modelizando.



**Ecuación 1.** Reacción de CH<sub>4</sub> con radicales OH.

También hay que tener en cuenta que el metano es producido por gran cantidad de procesos, incluyéndose fuentes tanto antropogénicas como naturales, y una mayor certeza en las predicciones requerirá de la integración de muchos datos. Es difícil estimar emisiones antropogénicas, además, por el carácter no intencional de las fugas en la producción de combustibles fósiles, o en la agricultura (genera dificultad en las estimaciones bottom-up). Además, en la atmósfera es eliminado principalmente, por radicales OH, que tienen un tiempo de permanencia en la atmósfera muy corto.

En 2022, la Agencia Internacional de Energía (AIE) emitió un estudio en el cual se detallaba que el metano procedente de fuentes naturales supone alrededor de un 40 % de las emisiones actuales, mientras que las fuentes antropogénicas serían el 60 %

restantes (Methane Matters, 2022). Se estima que, globalmente, un 25 % proviene de la agricultura y ganadería, un 21 % tiene origen en la industria de los combustibles fósiles, un 12 % se relaciona con residuos y el 2 % restante se debe a otros factores, tal y como se muestra en la [Tabla 1](#).

25%	Agricultura y ganadería
21%	Combustibles fósiles
12%	Residuos
2%	Otros

**Tabla 1.** Desglose de las fuentes de metano antropogénicas en el panorama global.

En cuanto a las fuentes naturales, los humedales son los más importantes y se considera que un tercio de las emisiones globales (tanto naturales como antropogénicas) provienen de estos ecosistemas (Zhang et al., 2017). Aunque se dan grandes incertidumbres en las estimaciones para los mismos, por lo que el valor calculado fluctúa (Saunois et al., 2020).

El metano biogénico es el producto final de la descomposición de materia orgánica por parte de bacterias metanogénicas, pertenecientes al dominio *Archaea*, en ambientes anaerobios como puedan ser suelos saturados de agua, pantanos, plantaciones de arroz, sedimentos marinos, vertederos, alcantarillado y plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR), o del sistema digestivo de los animales.

El metano termogénico es aquel que se forma en escala geológica por la descomposición de materia orgánica enterrada, debido al calor y a la presión. En último lugar, el metano pirogénico es el que se produce como consecuencia de la combustión incompleta de biomasa y otras materias orgánicas. Las principales fuentes de metano pirogénico son: incendios en turbas, quema de biomasa en bosques deforestados o áreas degradadas, incendios incontrolados, y la quema de biocombustibles. Pueden ser de origen biogénico o térmico los hidratos de metano

Se considera que una fuente de metano es natural cuando se hace referencia a emisiones previas a la aparición de la agricultura. Por otro lado, se consideran fuentes antropogénicas aquellas causadas directamente por las actividades humanas posteriormente a dicho periodo. Entre las fuentes naturales encontramos humedales y otros sistemas acuáticos continentales, fuentes geológicas, termitas, animales salvajes, fuentes oceánicas, permafrost terrestre e hidratos de metano. Entre las fuentes antropogénicas contamos con la combustión y el uso de combustibles (minería de carbón, sistemas de combustible y gas natural), agricultura y sus residuos (ganadería, cultivo de arroz, gestión de residuos), quema de biomasa y de combustibles fósiles, y otras fuentes, como por ejemplo emisiones del transporte marítimo.

En la minería de carbón, el metano atrapado en los depósitos de carbón y estratos circundantes es liberado durante las operaciones mineras normales. El manejo posterior también genera emisiones. Las pérdidas de metano ocurren durante la producción, procesamiento, almacenamiento, transmisión y distribución del gas natural, ya que es el componente principal del mismo (Barone et al., 2011). La producción, refinamiento, transporte y almacenamiento de petróleo crudo también es una fuente de emisiones de metano, debido a que dicho gas se encuentra a menudo junto con el petróleo (Barone et al., 2011).

El ganado genera metano por fermentación entérica y la gestión de estiércol. Las emisiones por parte de los procesos digestivos de otros animales no son notables (Barone et al., 2011). La generación del estiércol de ganado también produce metano. En relación con el cultivo de arroz, el metano se forma en la época de crecimiento en plantaciones de arroz (cuando el suelo se encuentra encharcado) debido a la acción de bacterias metanogénicas presentes en el sustrato.

En lo que a la gestión de residuos respecta, el metano procede de vertederos, debido a la descomposición en condiciones anaeróbicas. La gestión de residuos en vertederos genera metano cuando se dan condiciones anaerobias.

La quema de biomasa (quemadas de vegetación o de combustibles fósiles, residuos orgánicos, etc.) produce metano cuando se realiza de forma incompleta (Saunois et al., 2020). Los combustibles fósiles son biomasa que se utilizan para conseguir energía a utilizar con fines domésticos, industriales, comerciales o de transporte (Barone et al., 2011). Una fuente relacionada que tiene relevancia en el contexto de este trabajo son las emisiones por parte del tránsito marítimo. De acuerdo con la federación "Transports & Environment (T&E)", los barcos de gas natural licuado (GNL), publicitados como "sostenibles", liberan a la atmósfera cantidades considerables de metano, siendo consecuentemente peores para el cambio climático que navíos con otro tipo de motores (Transport & Environment, 2022).

Respecto a las fuentes naturales, una de las más relevantes son los humedales, los cuales presentan suelos saturados que producen condiciones anóxicas, donde se dan procesos microbianos anaeróbicos. Estos ocupan aproximadamente un 5 % de la superficie terrestre (Barone et al., 2011), y a pesar de su reconocida notoriedad se dan grandes incertidumbres en los cálculos de las emisiones de metano. En otros sistemas acuáticos continentales también se genera metano, por lo general en todos los cuerpos de agua se dan procesos microbiológicos tanto en la columna de agua como en los sedimentos que generan este gas. Los océanos, sin embargo, tienden a ser consideradas fuentes menores.

El metano puede emitirse desde el interior de la corteza terrestre, teniendo fuente geológica (tanto si el origen es marino, como terrestre). Esto puede darse mediante

macrofiltraciones, como eventos de fumarolas o volcanes de lodo, entre otros; o como resultado de fuentes difusas.

Los animales salvajes también son una fuente, por la fermentación entérica que se da en los rumiantes. Destacan, también, las termitas y otros artrópodos terrestres, que producen metano en la digestión de materia orgánica. Su hábitat depende del clima y los cambios que se den en el mismo.

El metano también puede proceder del permafrost terrestre e hidratos de metano (submarinos o terrestres). El permafrost es suelo, sedimento o detrito que permanece congelado al menos dos años, y que puede ser una fuente natural de metano, ya que lo emite al descongelarse (Barone et al., 2011). Las emisiones actuales de esta fuente son mínimas, pero debido a las actuales evidencias de deshielo debido al cambio climático, es una fuente relevante a considerar, ya que el calentamiento climático debido al metano es un proceso que se está retroalimentado de forma intensa (Thakur & Solanki, 2022). Los hidratos de gas son cristales similares al hielo, formados por moléculas de agua y de gases como el metano en condiciones de alta presión y temperatura (Barone et al., 2011). Gran cantidad de estos existen en sistemas submarinos profundos (plataformas continentales), y cantidades menores se dan bajo regiones de permafrost. Los hidratos de gas pueden almacenar grandes cantidades de los gases que atrapan y son estables dentro de un rango específico de temperatura y presión conocido como zona de estabilidad. En las condiciones actuales, las emisiones de metano de los hidratos de gas son pequeñas, sin embargo, al igual que ocurre con el permafrost, el cambio climático amenaza con producir un aumento significativo de las cantidades liberadas por esta fuente (Thakur & Solanki, 2022).

Finalmente, se dan otras fuentes naturales, como puedan ser, por ejemplo, las emisiones espontáneas de depósitos de materia fósil, incendios de origen no antropogénico o algunos tipos de sustratos.

Entre los sumideros de metano atmosférico encontramos, en menor medida, algunos sustratos donde éste queda atrapado por oxidación debido a la presencia de bacterias metanogénicas o la capa límite marina, donde se pierde por reacciones fotoquímicas. Una cantidad menor se pierde, también, en la estratosfera debido a reacciones fotoquímicas. De forma mayoritaria, el metano desaparece debido a reacciones de oxidación con el ya mencionado radical OH que se encuentra en la troposfera (Saunio et al., 2020). Cabe mencionar que los modelos de química atmosférica presentan incertidumbres del orden del 20-40 % (Saunio et al., 2020). El conjunto de fuentes y sumideros pueden combinarse para convertirse en una ecuación compleja que determina el balance global del metano.

## **1.4. Últimos tratados o acuerdos internacionales firmados sobre el metano**

Recientemente, el metano tuvo un papel destacado en la COP26 (Cumbre mundial del clima edición 26) celebrada en Glasgow en 2021. Durante esta cumbre se puso en marcha una iniciativa liderada por la Unión Europea y los Estados Unidos (UE-EEUU), conocida como “Compromiso Mundial sobre el Metano” (Global Methane Pledge). La Unión Europea es el sexto mayor emisor de metano, mientras que Estados Unidos es el tercero. Los países que decidieron unirse a esta iniciativa se comprometen a alcanzar un objetivo colectivo que consiste en una reducción de las emisiones mundiales de metano con respecto a 2020, para el año 2030; también a progresar en la aplicación de los métodos de inventarios disponibles para cuantificar emisiones de metano; así como, en el establecimiento de un Observatorio Internacional de Emisiones de Metano (IMEO).

Se estima que la consecución satisfactoria de estos objetivos reduciría el calentamiento en al menos 0,2 °C, de la actualidad al año 2050. A pesar de los distintos perfiles de emisión y potencial de reducción, todos los países pueden contribuir en la consecución del objetivo de disminución de las emisiones, mediante reducciones adicionales; así como, mediante medidas de cooperación internacional. Una reducción de las emisiones de metano también implicaría una mejora de la salud pública.

103 países se adhirieron al Compromiso Mundial sobre el Metano, que suponen alrededor de un 70% de la economía mundial y se emiten casi la mitad del metano antropogénico. Es destacable la ausencia de tres de los grandes emisores: China, Rusia y la India; estos países representan alrededor del 35% de las emisiones antropogénicas globales (International Energy Agency, 2021).

Relativa a este Pacto (aunque es previa al mismo) encontramos la Estrategia Europea contra el Metano, consistente en legislación, así como una serie de medidas y programas. Esta estrategia supone una manifestación de la conciencia que están tomando distintas regiones y países con respecto a la necesidad de actuar para abordar el problema del metano.

Como parte de esta estrategia surgió la Coalición del Clima y Aire Limpio (Climate and Clean Air Coalition), conformada por entidades de distinta naturaleza que se asocian de forma voluntaria, siendo su objetivo trabajar para disminuir la concentración atmosférica de contaminantes de vida corta. Esta coalición aparece inicialmente en 2012 y lleva trabajando desde entonces mediante el desarrollo de diversas iniciativas, entre las que destaca la Asociación del Petróleo y Gas Metano (Oil and Gas Methane Partnership, OGMP). A la OGMP pueden unirse gobiernos, organizaciones internacionales, organizaciones no gubernamentales, o empresas de la industria del

petróleo y el gas; el objetivo es crear conciencia sobre las emisiones de metano, y la organización provee de protocolos para ayudar a reducir emisiones de metano de forma sistemática, así como una plataforma con credibilidad que permite a los miembros demostrar sus reducciones.

Cabe también mencionar la COP27, celebrada en Egipto en noviembre de 2022, por el lanzamiento de MARS (Methane Alert and Response System o, en español, Sistema de Alerta y Respuesta de Metano) (Figura 2), una iniciativa que busca fortalecer los esfuerzos mundiales para identificar y abordar de forma transparente las principales fuentes de emisiones.



**Figura 2.** Fases de actuación del Sistema de Alerta y Respuesta de Metano. (Fuente.)

Así, sería posible acelerar la implementación del Compromiso Global de Metano. Este sistema de alerta informará a gobiernos, empresas y operadores acerca de las fuentes principales de metano, para que sea más sencillo promover medidas de mitigación.

En la COP28 se informará sobre los resultados de la implementación inicial del proyecto.

## 1.5. Inventarios de emisiones, EDGAR y Copernicus

EDGAR (Emissions Database for Global Atmospheric Research) es un inventario de emisiones de metano elaborado por el Centro Común de Investigación, más conocido como JRC (Joint Research Center), una Dirección General de la Comisión Europea encargada de proporcionar datos de asesoramiento científico y técnicos a la Comisión y a los estados miembros.

En la página web oficial este inventario es descrito como una base de datos global, independiente y multipropósito, que utiliza estadísticas y metodologías consistentes y avaladas por el panel de IPCC. Entre los datos encontramos emisiones totales por país y mapas mediante datos anuales, mensuales y por hora.

Por otro lado, encontramos el programa Copernicus, que en contraste no es un simple inventario de emisiones, sino que llega mucho más lejos. Se trata de un programa creado igualmente por la Unión Europea, que se apoya en una familia de satélites

llamados Sentinel y en otras estructuras ya existentes, así como en un sistema de medición in situ desde aire, mar y tierra (Copernicus in detail | Copernicus, 2023). De este modo, obtiene y procesa una gran cantidad de datos.

Con relación a inventarios de emisiones, EDGAR es una de las fuentes de datos que utiliza el programa Copernicus para generar información.

## **1.6. Medidas de metano: redes de observación en tierra e instrumentación embarcada en satélite (AIRS y TROPOMI)**

Para conocer la concentración de metano atmosférico, en la actualidad se dispone de redes de observación en tierra que proporcionan información de superficie e instrumentación embarcada en satélites que permiten la medida del metano desde el espacio. En relación a la información de superficie, encontramos datos sobre metano en redes como puedan ser, entre otras GAW (Global Atmosphere Watch) o ICOS (Integrated Carbon Observation System).

En relación a instrumentación embarcada en satélite y en lo que a la NASA respecta, el principal instrumento de nuestro interés que permite obtener datos sobre concentración de metano en la atmósfera es AIRS (Atmospheric Infrared Sounder), el cual se encuentra embarcado a bordo del satélite Aqua. Entre otros datos, provee de forma diaria de información sobre gases traza, y características de la superficie terrestre y de las nubes; así como medidas en 3D de la temperatura y el vapor de agua en la columna atmosférica (Aumann et al., 2003). Los datos base empleados para realizar este trabajo provienen de este instrumento, y se proporcionará un mayor detalle en el apartado 2.3.

Mientras que, a nivel europeo, para el estudio de la concentración de metano en la atmósfera desde instrumentos embarcados en satélites, se dispone de TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) perteneciente a la Agencia Espacial Europea (ESA, 2012). Este instrumento está embarcado en un satélite llamado "Sentinel-5 Precursor" o Sentinel-5P, gestionado por la Agencia Espacial Europea como parte del proyecto Copernicus y puesto en órbita en octubre del año 2017. TROPOMI supone una innovación de las tecnologías DOAS, una técnica de "remote sensing" o detección remota que, fundamentándose en los principios de la espectroscopía de absorción, analiza la concentración de gases traza en la atmósfera a partir de la detección de las estructuras de sus bandas de absorción, tanto en la región espectral ultravioleta (UV) como en la visible (VIS). El instrumento TROPOMI es muy avanzado y nos permite mapear una gran cantidad de gases traza que son de importancia tanto por su efecto en nuestra salud, como por el impacto que tienen sobre nuestro clima.

TROPOMI asiste en la cuantificación de emisiones antropogénicas y naturales, y permite el estudio del ciclo de vida de dos de los principales gases de efecto invernadero, el metano y el ozono troposféricos; así como del CO, HCHO y SO<sub>2</sub>. Adicionalmente, permite la monitorización de partículas, cuyo efecto sobre la calidad del aire y el clima puede llegar a tener efectos a escala global.

## **1.7. La problemática del golfo de Cádiz en cuanto al metano**

De las fuentes mencionadas de metano, las que podrían ser aplicadas al golfo de Cádiz de forma más determinante, sería el transporte marítimo, ya que se encuentra en una zona de alto tráfico, debido a su cercanía con el estrecho de Gibraltar y la presencia de puertos estratégicos, tanto desde el punto de vista del turismo, como militar. Este transporte podría verse intensificado, adicionalmente, debido a la modificación en intensificación de las rutas marítimas debido al deshielo del Ártico, lo que aumentaría la navegabilidad en dicha zona. Rusia, por ejemplo, perdería capacidad de control en esta zona, el deshielo resultaría en un aumento del tráfico por el norte de Eurasia que requeriría un paso más constante por el estrecho de Gibraltar, al resultar esta ruta más eficiente que atravesar el canal de Suez. Así el deshielo del Ártico tendría múltiples efectos sobre las concentraciones atmosféricas de metano en el golfo de Cádiz, tanto por el aumento de las emisiones de navíos, como por la liberación de este gas por derretimiento del permafrost y de hidratos de metano.

En la zona del golfo de Cádiz y bajo-medio valle del Guadalquivir, se tienen numerosos humedales, estuarios y zonas de marismas. Como ya se ha mencionado previamente, los humedales son una fuente importante de metano, los estuarios también lo liberan y la producción procedente del mar también puede considerarse. Directamente en el golfo de Cádiz desemboca el río Guadalquivir, donde se ubica el Parque Nacional de Doñana, con una extensión de más de 27000 ha de marisma. En la misma área también se ubican los estuarios del río Tinto y Odiel, y del río Piedras, siendo éstos otros ejemplos de áreas húmedas en la zona.

Además, se debe considerar potenciales escapes debido al transporte y almacenamiento de gas natural, ya que Andalucía se considera una región estratégica de entrada del mismo en el sistema nacional y europeo (Consejería de Industria, Energía y Minas (Junta de Andalucía), s. f.). La producción nacional es escasa, pero encontramos yacimientos en el valle del Guadalquivir y el golfo de Cádiz (Marismas-Poseidón).

Otras fuentes relevantes podrían ser los residuos (vertederos, gestión de aguas residuales...), la ganadería, e incluso los incendios, tanto provocados como naturales que tienden a darse en los meses estivales.

## **1.8. Objetivo del trabajo de investigación.**

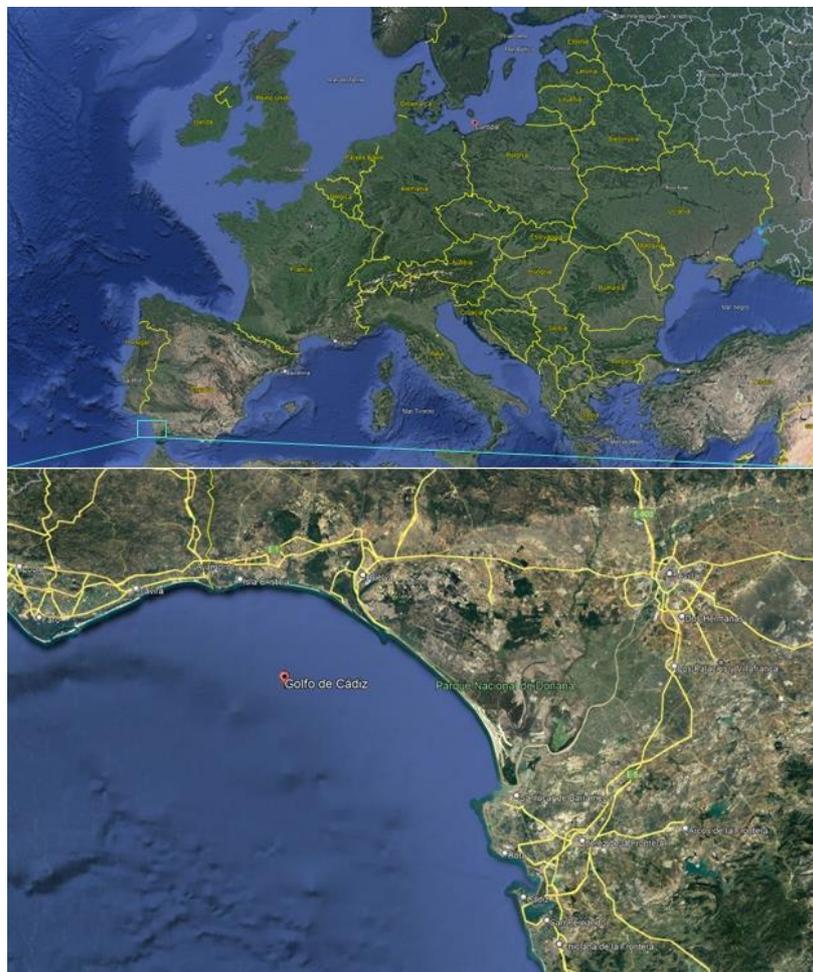
El objetivo de este trabajo, enmarcado en un contexto de cambio climático regional, será realizar una primera aproximación a las concentraciones de metano en la región. A partir de las observaciones de satélite, se determinará su evolución temporal, promedio mensual y tendencia en las últimas décadas. Además, se investigará a partir de un inventario de emisiones global, la evolución y tendencia de las emisiones de metano en la región de estudio. De este modo se podrá comparar la evolución de las emisiones y de las concentraciones; permitiendo mejorar nuestro conocimiento del metano en el área del golfo de Cádiz.

## CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Descripción de la región de estudio

El golfo de Cádiz (Figura 3) se encuentra en el extremo suroeste de Europa, en el límite entre el sur de Europa y el norte de África, estando ambos continentes separados por el estrecho de Gibraltar, el cual delimita el comienzo del mar Mediterráneo. En el golfo de Cádiz desemboca el valle del Guadalquivir. Esta zona se caracteriza, por ser una región de transición atlántico-mediterránea.

Presenta una climatología caracterizada por la influencia de los sistemas de alta presión atlánticos y por las bajas que se forman en el Mediterráneo occidental y norte de África, dando lugar en ocasiones a gradientes de presión que originan fuertes vientos en la zona del estrecho de Gibraltar.



**Figura 3.** Localización del golfo de Cádiz en el continente europeo (Fuente: Google Earth).

Es una zona con núcleos urbanos como los de Huelva, Jerez y Cádiz, Sevilla, y la presencia de complejos industriales en la zona de Huelva y la bahía de Algeciras. Todos ellos potencialmente emisores de metano. Es una región con áreas naturales protegidas, destacando el parque Nacional de Doñana.

## **2.2. Inventario de emisiones de Copernicus**

El sistema Copernicus proporciona un inventario de emisiones global de numerosas especies tanto gaseosas como en la fase particulada. Entre ellas, se pueden obtener información de las emisiones de gases de efecto invernadero, y en nuestro caso de metano.

Proporciona información con una cobertura global (todo el planeta), con una resolución temporal mensual y espacial de  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (latitud x longitud), aproximadamente un dato para una rejilla de  $10 \text{ km}^2$ .

Se pueden descargar la información en formato netcdf. Una vez descargados los ficheros globales de la especie y periodo de interés, en nuestro caso metano para el periodo desde 2000 hasta 2020; se hace necesario tener un programa diseñado para tal objetivo, que permita extraer el valor promedio de las emisiones de una región concreta. En nuestro caso fue utilizado un programa escrito en Matlab, que permitió extraer la serie temporal de las emisiones de una región definida para el golfo de Cádiz, comprendida entre  $36^\circ$  y  $38.5^\circ$  N, y entre  $5.5^\circ$  y  $8.5^\circ$  W.

Se utilizaron las emisiones de metano de origen antropogénico. A su vez estas emisiones se agrupan por sectores, concretamente para el caso del metano se utilizan doce sectores.

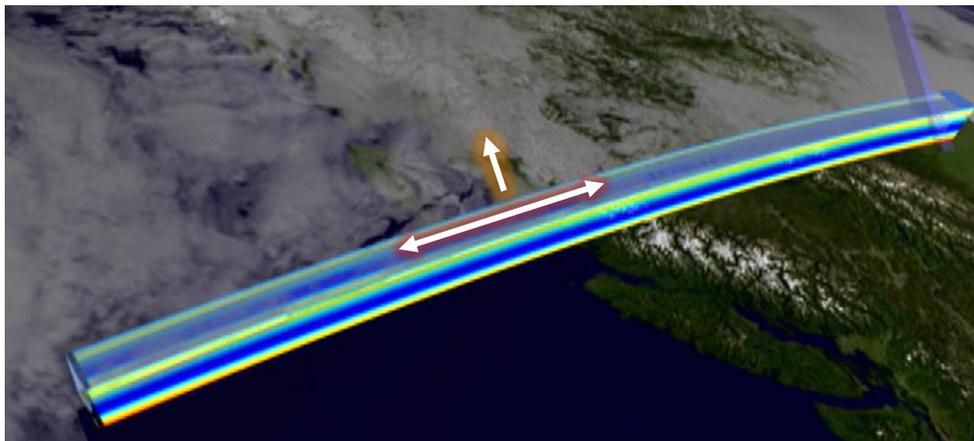
## **2.3. Observaciones de metano desde satélite: AIRS (*Atmospheric Infrared sounder*)**

Las observaciones de metano atmosférico analizadas en este trabajo provienen de AIRS (Atmospheric Infrared Sounder, en español, "Sonda atmosférica infrarroja"), uno de los seis instrumentos que se encuentran a bordo del satélite Aqua, de la NASA. Este fue puesto en órbita en el año 2002 con el objetivo de apoyar la investigación climática y mejorar las predicciones del tiempo, y forma parte del Sistema de Observación de la Tierra (Earth Observing System, EOS) de dicha institución. Asimismo, forma parte de la constelación de satélites "The Afternoon", también conocida como "A-train". Estaba planeado que Aqua funcionase durante seis años, sin embargo, lleva aportando datos sobre ciclos globales de agua y energía,

variaciones y tendencias climáticas, y respuestas del sistema atmosférico frente al incremento de la producción de gases de efecto invernadero desde 2002 hasta la actualidad, es decir, más de dos décadas.

El instrumento AIRS es una sonda muy avanzada con capacidad para observar 2378 canales de frecuencia en la banda del infrarrojo; así como, cuatro canales en la banda visible/cercana al infrarrojo. Esto le permite producir mapas tridimensionales de la temperatura del aire y la superficie, de la concentración de vapor de agua e información sobre características de las nubes. Además, proporciona información sobre gases de efecto invernadero y reactivos: metano, dióxido de carbono, ozono o monóxido de carbono (Aumann et al., 2003).

Las principales características del instrumento son las siguientes: se trata de un espectrómetro infrarrojo de rejilla, multiespectral, de alta resolución, operado combinadamente con AMSU-A, y también con la Sonda de Humedad para Brasil (Humidity Sounder for Brazil, HSB) con el fin de llegar a su máxima capacidad con relación a análisis y predicción del tiempo. Cabe comentar que mide la radiación emitida por la Tierra de 0,4-1  $\mu\text{m}$  y 3,7-15,4  $\mu\text{m}$  con resolución espectral de 1200 ( $\lambda/\Delta\lambda$ ), a lo largo de una franja de observación de 1650 Km (Figura 4).



**Figura 4.** Ejemplo de la franja que escanea AIRS, al tiempo que el satélite avanza paralelamente a la longitud de la misma. (Fuente: captura de un vídeo de la NASA)

Las observaciones de metano obtenidas con el instrumento AIRS desde 2002 hasta 2022, han sido la base de este trabajo de investigación. Este instrumento no sólo permite la media de especies químicas en la columna atmosférica de forma integrada, sino que, a partir de la aplicación de una serie de algoritmos, permite la estimación de la concentración en determinados niveles verticales, concretamente en niveles de presión. Para nuestro trabajo fue seleccionado el nivel de presión de 1000 hPa, más cercano y representativo de la superficie.

Como el instrumento AIRS está embarcado en un satélite de órbita polar, se obtienen medidas diarias tanto para las orbitas ascendentes como para las descendentes. De

esta forma cada día se tendrían dos medidas correspondientes las mencionadas orbitas; en nuestro caso se han utilizado ambas medidas.

## 2.4. Fuentes de información y tratamiento de datos

Las medidas de metano, obtenidas con el instrumento AIRS de la NASA, fueron descargadas a través de la plataforma Giovanni, el cual es un acrónimo que proviene de “Geospatial Interactive Online Visualization ANd aNalysis Infrastructure” (Infraestructura Online de Visualización y Análisis Interactivo Geoespacial), siendo accesible de forma gratuita y abierta.

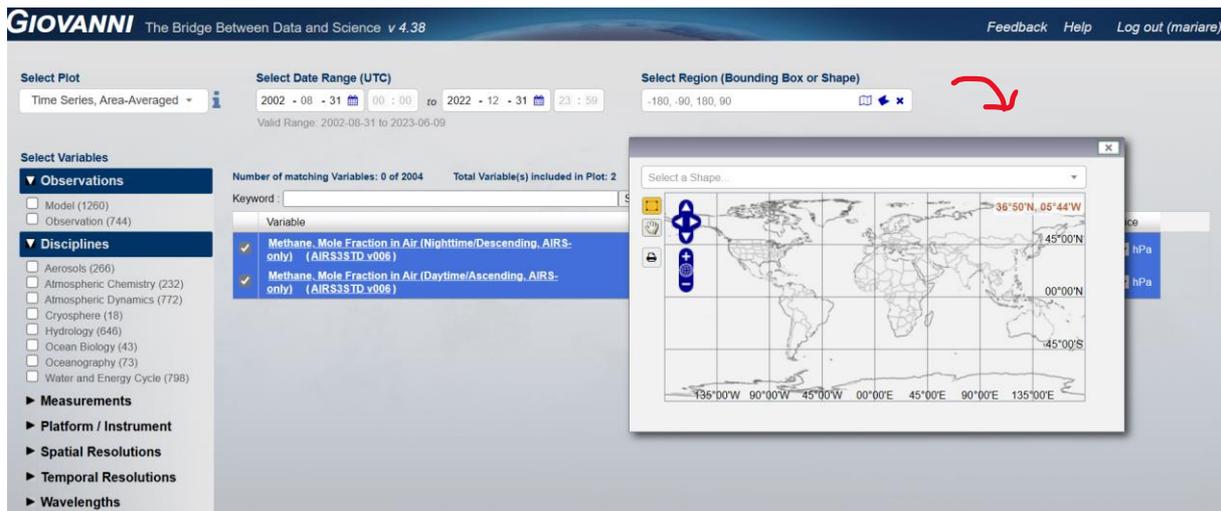
Estos datos se presentan de forma simple e intuitiva, y puede analizarse y visualizarse gran cantidad de información proveniente de técnicas de “remote sensing”, siendo opcional la descarga de esta.

En nuestro caso, para realizar este trabajo, los datos han sido descargados de dicha plataforma entrando primero en la misma: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>, y creando un usuario. Tras acceder, se han seleccionado los parámetros de interés (Figura 5).

The screenshot shows the GIOVANNI search interface. The header includes the logo and version information. A sidebar on the left allows filtering by Disciplines (Atmospheric Chemistry), Measurements (Air Temperature, CH4, CO, Ozone), Platform/Instrument (AIRS), Spatial Resolutions, and Temporal Resolutions (daily, monthly). The main area displays a table of search results for 'Methane Mole Fraction in Air'. The table has columns for Variable, Units, Source, Temp. Res., Spat. Res., Begin Date, End Date, and Vert. Slice. Two variables are selected with checkmarks: 'Methane Mole Fraction in Air (Nighttime/Descending, AIRS-only) (AIRS3STD\_v006)' and 'Methane Mole Fraction in Air (Daytime/Ascending, AIRS-only) (AIRS3STD\_v006)'. Both are in ppbv units, from AIRS, with a daily temporal resolution and 1° spatial resolution. The selected variables have a vertical slice of 1000 hPa. The interface also shows the number of matching variables (8 of 2004) and a total of 2 variables included in the plot.

Figura 5. Búsqueda de datos en la plataforma Giovanni.

Los datos descargados han sido los que se muestran seleccionados en la imagen, y corresponden a la concentración de metano en ppb (partes por billón), tanto para la órbita ascendente como descendente para el periodo seleccionado, del 31 de agosto de 2002, al día 31 de diciembre de 2022. A continuación, se ha seleccionado el área geográfica de interés en los campos que se muestran en la Figura 6.



**Figura 6.** Búsqueda de datos en la plataforma Giovanni.

Las coordenadas de nuestra región de interés fueron las ya mencionadas previamente (36° a 38.5° N, 5.5° a 8.5° W) y que cubre el golfo de Cádiz. Lo que se obtiene de esta forma es un valor para cada día de la concentración de metano promedio de la región seleccionada en el nivel de presión más cercano a la superficie. Como se eligieron las medidas tanto de la órbita descendente como ascendente, se obtuvieron los datos en dos ficheros de texto que posteriormente se abrieron y se convirtieron a dos ficheros Excel, correspondientes a las órbitas ascendentes y descendentes.

Para tratar los datos, estos se han unido en una única plantilla de Excel, y organizado en columnas de la siguiente forma:

Mes	Concentración en modo ascendente (ppb)	Concentración en modo descendente (ppb)
-----	--	---

Se han eliminado todas las filas en las que alguno de los datos no estaba presente y, a continuación, ha sido calculada la concentración media diaria en ppb para el conjunto de datos resultantes, realizando la media entre la concentración de la órbita ascendente y descendente.

Tras obtener estas medias, utilizando fórmulas de Excel, se ha calculado el valor medio por mes y año, y la desviación estándar de dicho valor. A partir de la serie temporal de las medias mensuales por año se genera una gráfica que presenta la variación de la concentración en función del tiempo. Además, se ha calculado la tendencia de la serie utilizando una aproximación lineal de ajuste por mínimos cuadrados.

Utilizando los valores medios mensuales de cada año, se han calculado el promedio mensual del conjunto de todos los años. También, la desviación estándar de estos valores.

Como se ha mencionado previamente, para este trabajo el análisis de las emisiones de metano se ha realizado a partir de la información proporcionada por el inventario de emisiones de Copernicus. Se extrajo la evolución mensual de las emisiones medias de la misma región utilizada para las concentraciones con AIRS.

Se ha analizado la evolución de las medias mensuales para todos los meses desde enero del 2000 hasta diciembre del 2020. Los ficheros que se han utilizado en formato Excel se presentaban en tres columnas con información del año, mes, y valor medio de emisión de metano. Se ha generado un gráfico con la evolución temporal de toda la serie, y al igual que se ha hecho para las concentraciones, se calculó la tendencia lineal.

Se ha generado un nuevo fichero de Excel, y al igual que se ha realizado para las observaciones, se ha calculado la media por mes y su desviación estándar.

Además, se han estudiado las anomalías restando a los distintos valores la media para el mes dado, y calculando la recta del conjunto de valores obtenidos.

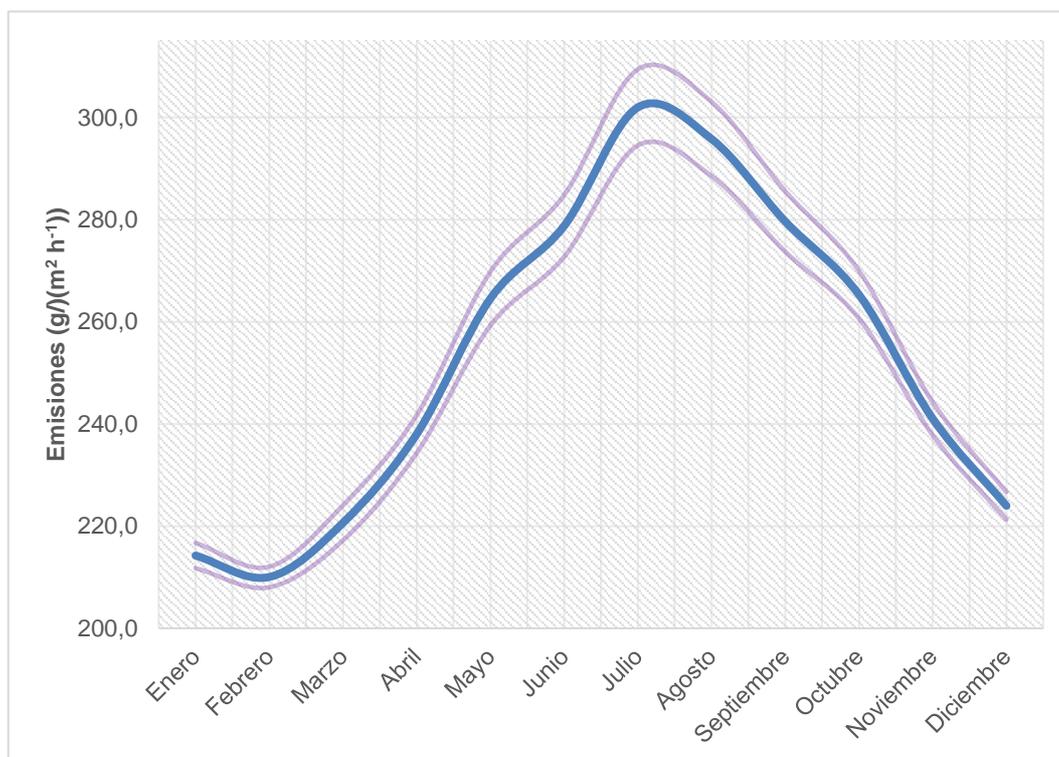
## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Emisiones de metano en la región de estudio

A partir de los valores mensuales del inventario de emisiones de Copernicus, mencionado en la sección 2.2, se ha extraído la serie temporal de emisiones de metano, promediando para una región que cubre el golfo de Cádiz (36° a 38.5° de latitud norte y desde 8.5° a 5.5° de longitud oeste), en el periodo 2000 a 2020. A partir de la mencionada serie, se ha calculado la evolución medida mensual (Figura 7).

Las emisiones de metano en la región de estudio presentan una clara evolución mensual, con mínimos que se observan en los meses más fríos y húmedos, mínimo en febrero con  $210 \pm 2,0 \text{ g km}^2 \text{ h}^{-1}$ ; y valores más altos en los meses más secos y cálidos; con un máximo mensual en el mes de julio de  $302 \pm 7,4 \text{ g km}^2 \text{ h}^{-1}$ .

Desde el invierno, se observa una clara tendencia creciente, las emisiones se incrementan desde febrero a un ritmo de  $18 \text{ g km}^2 \text{ h}^{-1}$  por mes (entre febrero y julio), hasta alcanzar el mencionado máximo de julio. Por el contrario, desde los meses centrales del verano, las emisiones decrecen a un ritmo de  $15 \text{ g km}^2 \text{ h}^{-1}$  por mes (entre julio y diciembre), alcanzando el mínimo de invierno.



**Figura 7.** Evolución media mensual de las emisiones de metano (línea azul) y su desviación estándar ( $\pm 1\sigma$ ) (líneas magentas) en el golfo de Cádiz. Periodo de 2000 a 2020.

La evolución mensual media obtenida, presenta un comportamiento similar a la variación mensual de la temperatura. Un aumento de la temperatura pudiera estar asociado con un aumento de las emisiones de metano de origen biogénico, generados mayoritariamente por acción de organismos metanogénicos.

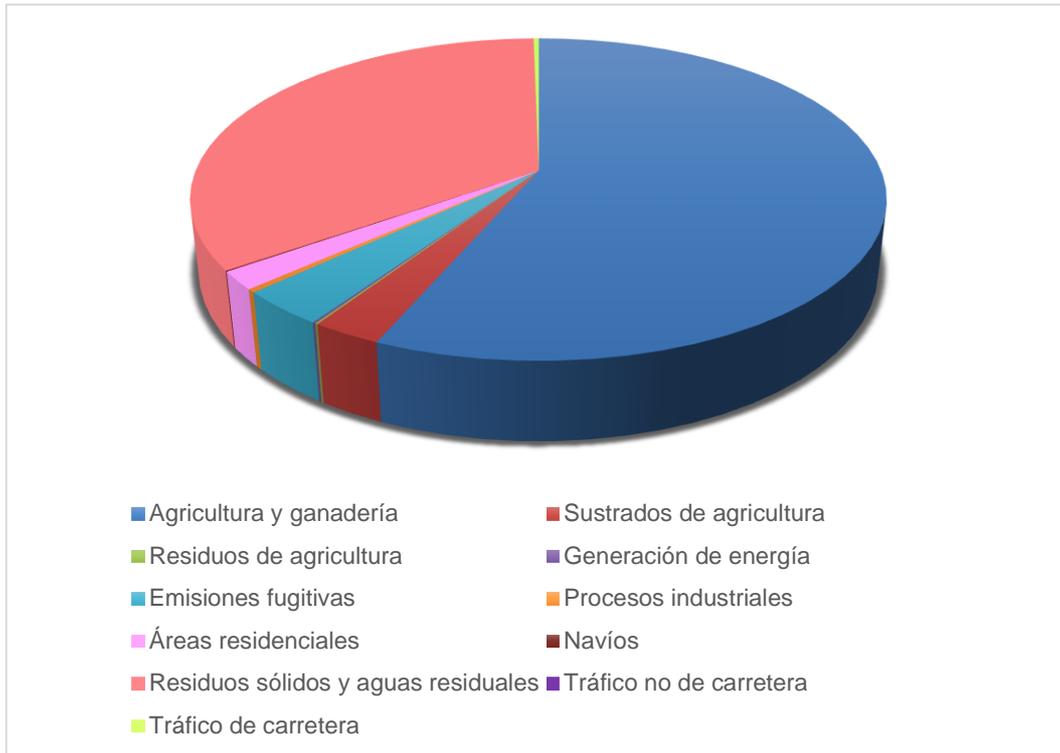
En la región de estudio, estas fuentes se pudieran encontrar en las aguas continentales como los humedales, estuarios; además del propio océano. En el golfo de Cádiz abundan los estuarios y zonas de marismas, los cuales pudieran estar emitiendo metano en función de la temperatura. Las temperaturas propias de la época estival en esta zona propiciarían una cinética óptima de los procesos metanogénicos (Pedraza et al., 2016).

En la región de estudio se encuentra el Parque Nacional de Doñana, en el cual se ubican extensos humedales, y zonas de cultivo de arroz en sus cercanías; humedales que deben estar contribuyendo al metano regional. En la actualidad se desconoce cuál es la contribución de estos humedales al metano de la región, serán necesarios llevar a cabo más estudios para determinarlo.

Aunque los océanos se consideran una fuente menor de metano en comparación con los humedales, se estima que producen entre el 7 y el 12% del atribuido a las fuentes naturales y, de este porcentaje, un 7-10% sería atribuible a los estuarios, que ocupan una superficie relativamente pequeña.

Las emisiones presentadas en la [Figura 7](#), muestran el total de emisiones. Sin embargo, el inventario de emisiones global de Copernicus considera once fuentes diferentes; de esta forma, se puede conocer que contribución de cada una de ella se tiene en la región de estudio.

La distribución de las fuentes y su porcentaje se presenta en la [Figura 8](#). Así, la agricultura y ganadería con 56.5% del total es la principal fuente de emisión de metano en la región, seguida de las emisiones procedentes de los residuos sólidos y aguas residuales con un 34,5 %. Por tanto, estas dos fuentes contribuyen casi al 90 % de las emisiones de metano. Con porcentajes inferiores se encuentran las emisiones fugitivas con un 3,5 % o las procedentes de áreas residenciales con 1,8 %, entre otras.

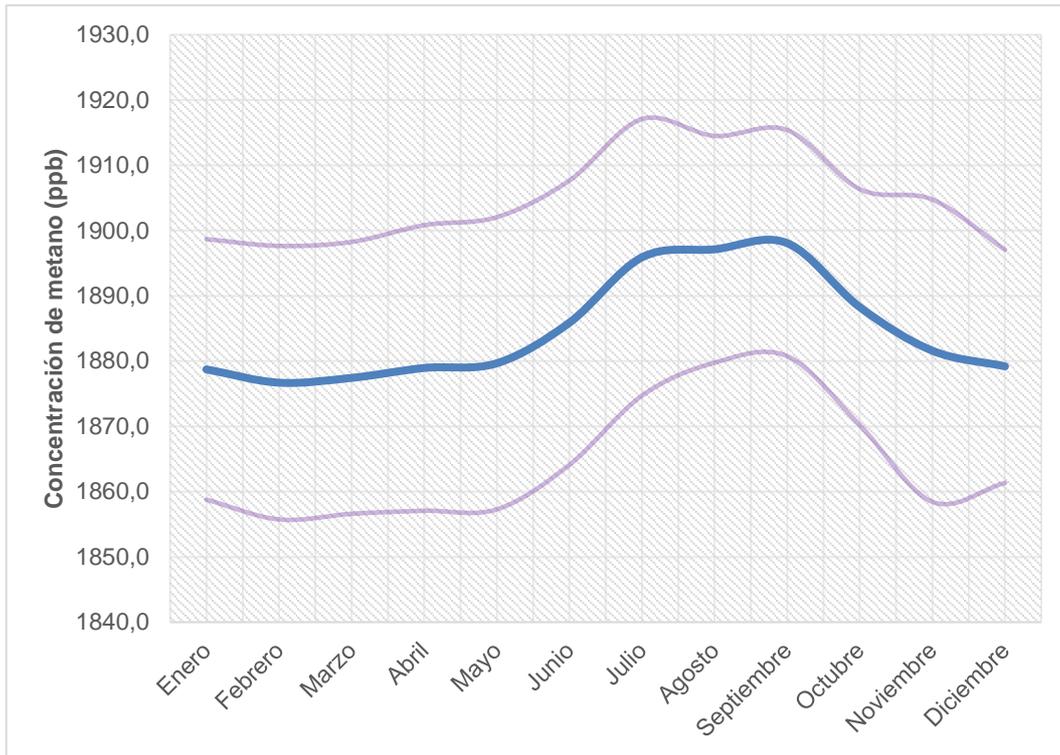


**Figura 8.** Contribución de las diferentes fuentes de emisión en la región de estudio desde enero del 2000 a diciembre de 2020.

### 3.2. Evolución mensual del metano atmosférico superficial

A partir de las observaciones del instrumento AIRS embarcado en el satélite Aqua de la NASA, como se ha presentado en la sección 2.3, se ha extraído para la región del golfo de Cádiz (similar a la utilizada para las emisiones) la serie temporal de observaciones diarias desde 2002 hasta 2022. A partir de esta serie promedio de la mencionada región, se han calculado las medias mensuales para cada mes y la evolución media mensual de todo el periodo, el cual se muestra en la [Figura 9](#).

El metano muestra una evolución mensual con concentraciones más bajas en los meses de invierno y primavera y valores más altos en los meses centrales del año. Concretamente, el mínimo mensual se obtiene en el mes de febrero con  $1876 \pm 21$  ppb y el máximo en el mes de septiembre con  $1898 \pm 17$  ppb, aunque las concentraciones de junio a agosto superan los 1890 ppb. Desde el mes de febrero hasta septiembre el metano muestra una tasa de incremento de alrededor de 3 ppb al mes; mientras que, desde el mes de septiembre hasta febrero muestra un descenso de alrededor de 6 ppb al mes.



**Figura 9.** Evolución media mensual de las concentraciones de metano (línea azul) obtenidas con el instrumento AIRS en el nivel de 1000 hPa y su desviación estándar ( $\pm 1\sigma$ ) (líneas magentas) en la región de estudio. Periodo 2002-2022.

Durante todo el año el metano presenta una variabilidad, obteniéndose valores de la desviación estándar de las medias mensuales que oscilan entre los 23,2 del mes de noviembre y los 17,3 del mes de septiembre. Esta desviación tan elevada estaría asociada a que el metano se ha ido incrementando durante el periodo de años considerado, como se mostrará y analizará en la siguiente Sección 3.3.

La concentración de metano observada en una región es el resultado de la contribución regional, más la global (que también se pudiera denominar como fondo, del inglés “background”) o externa a la región considerada. En la región objeto de estudio, se ha obtenido que la evolución mensual de las concentraciones medidas con AIRS presentan un patrón similar a la evolución de las emisiones regionales; valores más altos en los meses centrales del año y más bajos en los meses más fríos. Este resultado pudiera estar indicando que las emisiones regionales están modulando las concentraciones a escala regional, al menos en algunos meses. Sin embargo, no se ha obtenido una coincidencia exacta en los máximos y mínimos mensuales obtenidos para las emisiones y las concentraciones. Este resultado pudiera estar indicando que no se pudiera descartar que algunos meses la contribución de fondo o global tiene mayor importancia; mientras que otro, la mayor contribución se deba a las emisiones

regionales. La identificación de qué fuentes está contribuyendo cada mes y en qué cuantía, debiera ser objeto de estudios futuros.

### 3.3. Tendencia de las concentraciones y emisiones de metano.

En esta sección se analiza la evolución temporal y tendencia que ha presentado tanto las emisiones (en el periodo 2000 a 2020) como las concentraciones de metano (durante el periodo de 2002 hasta 2022) en la región del golfo de Cádiz (Figura 10). Como ya se discutió en el apartado 3.1, se puede apreciar que existe una clara estacionalidad, si bien ésta es más significativa en las emisiones que en las concentraciones en superficie.

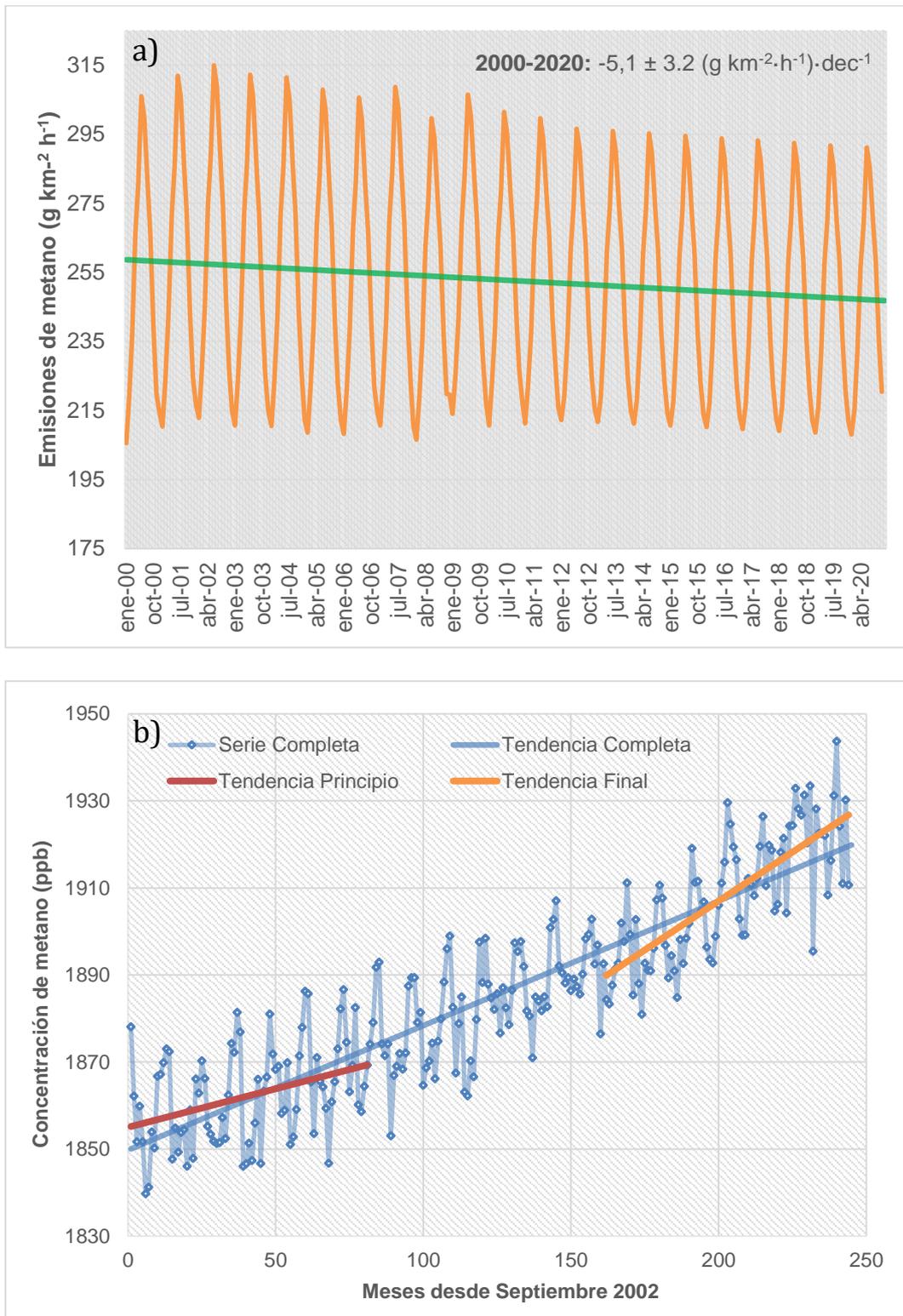
Las emisiones presentan una tendencia decreciente de  $-5,1 \pm 3.2$  ( $\text{g km}^{-2} \text{h}^{-1}$ )  $\text{dec}^{-1}$ , lo cual indicaría un ligero descenso de las emisiones (Figura 10 a). Considerando todo el periodo y utilizando como referencia el promedio mensual, se obtuvieron las anomalías para cada mes (Figura 11 a). A partir de la evolución mensual de las anomalías de las emisiones, se calculó la tendencia, obteniéndose un valor de  $-6.08 \pm 0.35$  ( $\text{g km}^{-2} \text{h}^{-1}$ )  $\text{dec}^{-1}$ , muy similar al obtenido con la serie mensual.

Como se ha mencionado previamente, las fuentes de metano más destacables de la región están asociadas a la agricultura y la ganadería y puede que no hayan sufrido grandes cambios en los últimos años.

Los censos ganaderos muestran que en la región de estudio se mantienen como una zona con la mayor densidad de cabezas de ganado en España. Los principales rumiantes en esta región son cabras, ovejas y vacas. A pesar de las fluctuaciones, el número de cabezas de ganado bovino se mantiene como en 1996, si bien se observa un aumento notable alrededor del año 2006. El ganado ovino muestra un pico similar alrededor de dicho año, sin embargo, el número de animales en la actualidad es menor al que había en el año 1996 y posteriores. En el caso del ganado caprino, los datos no son concluyentes, ya que los datos para los años previos al 2007 y el dicho presentan números distintos en dos series históricas. Sin embargo, en los últimos años puede apreciarse cierta estabilidad. Es decir, el número de cabezas de ganado se mantiene o disminuye en algunos casos, lo que pudiera ser coherente con la tendencia de ligera disminución que puede observarse.

Sin embargo, no se debe olvidar que existen otras fuentes de metano en la región. Así, por ejemplo, el sistema gasista comenzó a instalarse al final de la década de los 90 y continuó a lo largo de la época posterior. La zona marítima del golfo de Cádiz y los humedales y marismas de la zona emiten metano, pero la superficie de los mismos prácticamente no ha cambiado en los últimos años; aunque sí es probable que los

cambios en las temperaturas y en la disminución de las precipitaciones les pudieran estar afectando.



**Figura 10.** Evolución mensual de las emisiones de metano en el golfo de Cádiz obtenida a partir del inventario de Copernicus durante el periodo de 2000 a 2020 y su línea de tendencia (a). Evolución mensual de las concentraciones de metano medidas en el nivel de 1000 hPa por el instrumento AIRS (satélite AQUA) en el periodo 2002-2022 y su línea de tendencia, así como de la tendencia para los periodos inicial (2002-2009) y final (2016-2022) de la serie (b).

En la [Figura 10b](#), se presenta la evolución de las concentraciones de metano registradas por el instrumento AIRS. Como se puede observar, la evolución temporal del metano no ha dejado de incrementarse, un análisis y cálculo de la tendencia durante todo el periodo, revela que el metano se está incrementado a un ritmo de  $34,3 \pm 1.1$  ppb dec<sup>-1</sup>. Al igual que se ha realizado con las emisiones, también se calculó la evolución mensual de las anomalías y su tendencia ([Figura 11b](#)), obteniéndose en este caso un valor de  $33,9 \pm 1.3$  ppb dec<sup>-1</sup>; muy similar al obtenido con la serie mensual.

A nivel global la concentración de metano en la atmósfera se estabilizó a principio de la década de los 2000, y posteriormente se produjo un aumento más acuciado que no ha cesado desde entonces. Para nuestro caso del golfo de Cádiz, se puede observar ([Figura 10b](#)) que el ritmo de crecimiento del metano atmosférico no es similar al inicio y al final de la serie.

Para analizar con más detalle este hecho, se calculó la tendencia considerando únicamente los primeros y los últimos siete años de la serie. La tendencia obtenida para los primeros años fue de  $21.2 \pm 6.0$  ppb dec<sup>-1</sup> mientras que en los últimos años se ha obtenido un incremento de la tendencia hasta los  $54.0 \pm 5.1$  ppb dec<sup>-1</sup>. Es decir, se ha producido un ratio de incremento de 2.5 veces. El resultado obtenido, confirmaría que el ritmo de crecimiento del metano no ha sido constante durante los últimos 20 años; se ha más que duplicado en los últimos años lo que pudiera estar intensificando el efecto invernadero antropogénico que se está dando en la actualidad.

Conocer si los resultados obtenidos con el metano atmosférico en el área de estudio se están reproduciendo en la misma escala en el resto del planeta, requeriría de estudios futuros.

Por otra parte, al comparar la tendencia de las concentraciones con la tendencia de las emisiones regionales, resulta bastante evidente que las tendencias son completamente distintas. Mientras que las concentraciones presentan una clara tendencia creciente e incluso una aceleración de la misma en los últimos años, las emisiones presentan una tendencia ligeramente decreciente.

Estos resultados pudieran estar revelando que los inventarios de emisiones no son correctos, es decir, pudiera haber fuentes de emisión que no se están considerando. Por tanto, las emisiones se pudieran estar subestimando ya que existe un claro desajuste entre las emisiones y las concentraciones. Además, es necesario tener en cuenta que el metano tiene una vida media en la atmósfera superior a la década, por lo que los cambios en las emisiones tardarían décadas en apreciarse en las concentraciones, esto sigue sin coincidir con la tendencia obtenida en el último periodo, que sigue incrementándose incluso a un mayor ritmo que al principio.

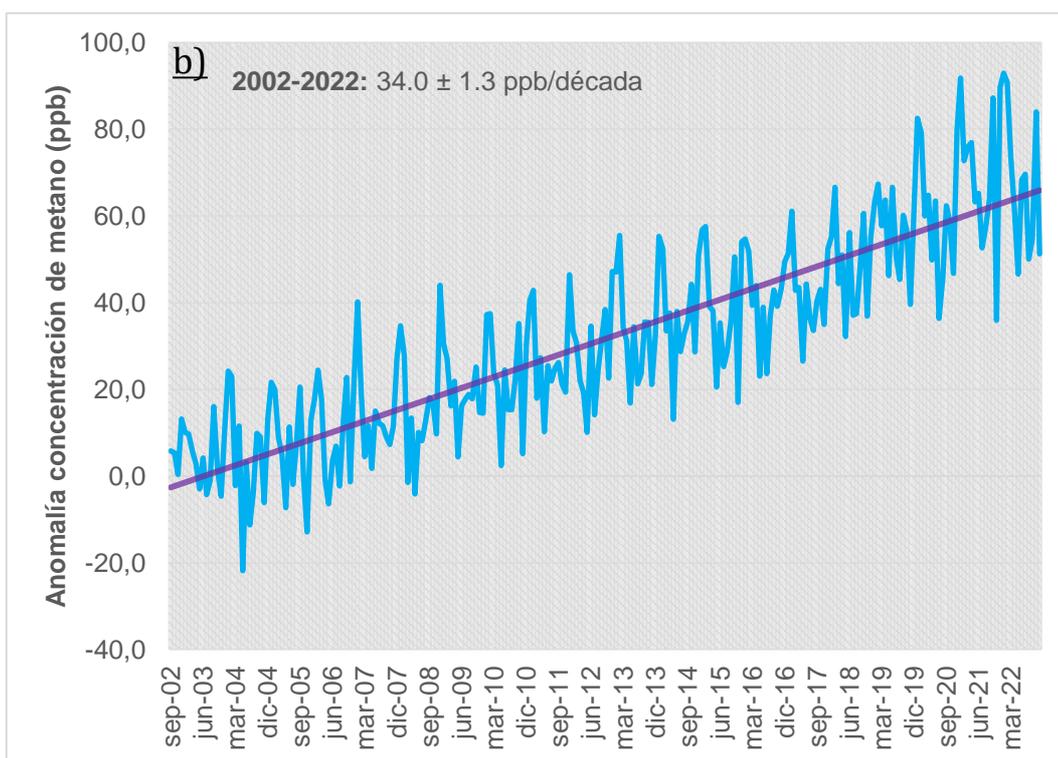
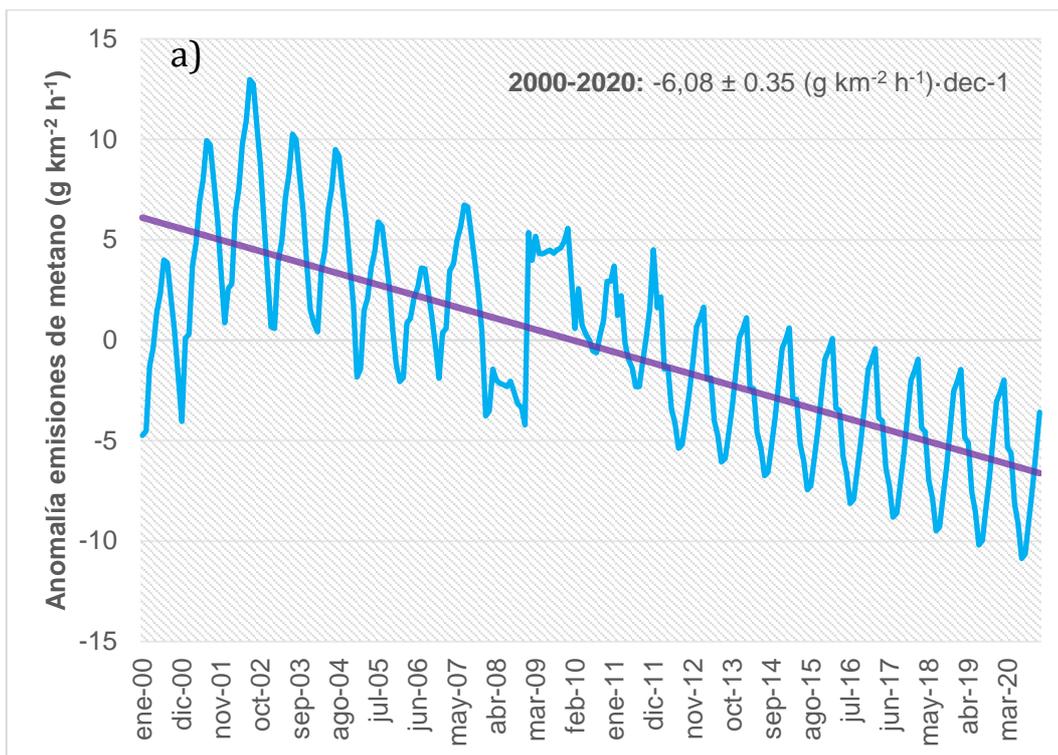
La media del conjunto de los datos de emisiones resulta 252,6 gramos de metano emitidos por kilómetro cuadrado y hora. Es decir, entre el comienzo del año 2000 y la finalización del año 2020, se emitieron aproximadamente 24,3 toneladas de metano por kilómetro cuadrado, lo que supone una media de alrededor de 2,2 toneladas al año por kilómetro cuadrado. En, “The Global Methane Budget” (Saunio et al., 2020) se estiman 524-560 teragramos por año entre 2000-2009, y 550-594 teragramos por año para la década de 2008-2017. Las emisiones anuales para el Golfo de Cádiz suponen, en comparación, un diminuto  $4 \cdot 10^{-7}$ % de las mismas. Esto tendría sentido, al tratarse de un área de superficie muy pequeña sin fuentes de contaminación por metano destacablemente notables.

Puede llegarse a la conclusión de que sobre el Golfo de Cádiz se da un aumento de la concentración de metano que tiene origen global, ya que las variaciones de las emisiones en el Golfo de Cádiz no pueden explicar el incremento sustancial observado en las concentraciones superficiales de metano.

Por otro lado, para estudiar el efecto de las variaciones interanuales, se han calculado y representado las anomalías correspondientes tanto para las emisiones, como para las concentraciones (Figura 11).

La oscilación interanual parece ser más amplia al comienzo de la serie, y más estable al final de la misma. Esto explica que tanto el mínimo como el máximo para el conjunto de la serie se de en los meses iniciales de la misma, en febrero de del año 2000 y julio del año 2002, respectivamente. En lo que al estudio de las anomalías respecta, se observa que la pendiente es ligeramente distinta a la tendencia de las emisiones. En este caso la pendiente es de  $-6,08 \pm 0.35$  ( $\text{g km}^{-2} \text{h}^{-1}$ )  $\text{dec}^{-1}$ . Si bien este valor es similar al obtenido para las emisiones medias, se puede observar que en este caso la tendencia decreciente es mucho más pronunciada.

En el caso de las concentraciones de metano atmosféricos sobre la región, ya habíamos observado una clara tendencia de aumento, que se da además de forma muy constante. El estudio de las anomalías genera una pendiente muy parecida a la tendencia de las observaciones, lo que denota que las variaciones interanuales no son notables. Los máximos y mínimos de la serie son coherentes con respecto a la tendencia. Los mínimos se encuentran en los años iniciales de la serie (2003 y 2006), y los máximos al final de esta.



**Figura 11.** Evolución mensual de las anomalías de las emisiones de metano en el golfo de Cádiz obtenida durante el periodo de 2000 a 2020 y línea de tendencia (a). Evolución mensual de las anomalías de las concentraciones de metano medidas en el nivel de 1000 hPa por el instrumento AIRS (satélite AQUA) en el periodo 2002-2022 y su línea de tendencia (b).

## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo se ha centrado en un análisis del metano atmosférico, en el golfo de Cádiz, con el objetivo de estudiar la evolución de las emisiones y sus concentraciones a nivel regional. Para ello, se han utilizado las observaciones del instrumento AIRS embarcado en el satélite Aqua de la NASA, y accesibles desde la plataforma Giovanni de la NASA. Concretamente, se han utilizado los valores diarios tanto de las orbitas ascendentes como descendentes en el nivel de presión de 1000 hPa, representativo de la superficie. El periodo de medidas utilizada cubre desde el 2002 hasta finales de 2022.

El análisis de las emisiones se ha realizado gracias a la información proporcionada por el inventario de emisiones global de Copernicus. Se han extraído y promediado las emisiones para el golfo de Cádiz, utilizándose la misma región que la usada para las observaciones de AIRS. En este caso, el periodo utilizado para este estudio fue desde 2000 hasta 2020, último año en el que hay información disponible.

La evolución mensual de los niveles tanto de concentración como de emisión de este gas muestra un comportamiento similar a la que muestra la temperatura.

A partir del análisis por sectores de las emisiones de metano, se obtiene que las principales fuentes regionales serían la agricultura y ganadería con un 56.5 % del total, y los residuos sólidos y aguas residuales con un 34.5 %; es decir, entre ambos sectores cubrirían el 91 % de las emisiones.

Del análisis de la evolución temporal de las emisiones y del cálculo de su tendencia, se obtiene que las emisiones de gas metano no habrían aumentado y, de hecho, muestran una tendencia decreciente de  $-5.1 \pm 3.2 \text{ g km}^2 \cdot \text{h}^{-1} \text{déc}^{-1}$ . Por otro lado, el cálculo de la tendencia de las anomalías proporciona un valor de  $-6.08 \pm 0.35 \text{ g km}^2 \cdot \text{h}^{-1} \text{déc}^{-1}$ , valor levemente más intenso pero similar al obtenido a partir de las emisiones mensuales.

Por el contrario, se ha obtenido que la concentración de metano ha aumentado de forma continua, resultando en una tendencia creciente de  $34,3 \pm 1.1 \text{ ppb dec}^{-1}$ . Sin embargo, esta tendencia no ha sido homogénea en las últimas décadas. Para investigar este hecho, se ha calculado la tendencia en el periodo desde 2002 a 2009, obteniendo una tendencia de  $21.2 \pm 6.0 \text{ ppb dec}^{-1}$ ; y para los últimos años desde 2016 a 2022, obteniéndose en este caso una tendencia de  $54.0 \pm 5.1 \text{ ppb dec}^{-1}$ . Es decir, ha habido una aceleración de la tendencia de metano con un ratio de 2.5.

El metano en la región de estudio no es que no haya dejado de incrementarse, sino que teniendo como referencia principios de la década de los 2000, en los últimos años se ha acelerado.

El resultado obtenido es que, en las últimas décadas, las emisiones en la región disminuyen ligeramente; mientras que, se incrementa e incluso se acelera la concentración desde el comienzo de los años 2000, pudiera estar indicando que las emisiones regionales no serían las causantes del incremento de metano observado. Aunque en los inventarios de emisión no sean tenidas en cuenta todas las fuentes, las diferencias obtenidas entre el comportamiento de las emisiones y de la concentración, indicaría que el incremento observado tiene su origen en la escala global.

Aplacar el cambio climático es un trabajo en grupo de nuestras sociedades, y es en el interés de la mayoría que debemos llevarlo a cabo de forma eficiente.

## REFERENCIAS

- Agencia Espacial Europea (ESA). (2012, 14 junio). *Copernicus: Sentinel-5P*. EOPortal. <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-5p#mission-capabilities>
- Andalucía - Sicma. (s. f.). Recuperado 6 de agosto de 2023, de <https://andalucia.sicma.red/clima/>
- Aumann, H. H., Chahine, M. T., Gautier, C., Goldberg, M. D., Kalnay, E., McMillin, L. M., Revercomb, H., Rosenkranz, P. W., Smith, W. L., Staelin, D. H., Strow, L. L., & Susskind, J. (2003). AIRS/AMSU/HSB on the aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2), 253-264. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808356>
- Bloom, A. A., Palmer, P. I., Fraser, A., Reay, D. S., & Frankenberg, C. (2010). Large-Scale Controls of Methanogenesis Inferred from Methane and Gravity Spaceborne Data. *Science*, 327(5963), 322-325. <https://doi.org/10.1126/science.1175176>
- Borunda, A. (2021, 3 noviembre). Un nuevo acuerdo, encabezado por Estados Unidos y la UE, ambiciona con reducir las emisiones del ultrapotente gas de efecto invernadero en un 30% para 2030. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2021/11/que-hay-detras-de-la-cop26-y-su-batalla-contra-el-metano>
- Christensen, T. Climate science: Understand Arctic methane variability. *Nature* 509, 279–281 (2014). <https://doi.org/10.1038/509279a>
- Consejería de Industria, Energía y Minas (Junta de Andalucía). (s. f.). *Sistema gasista*. Agencia Andaluza de la Energía. Recuperado 21 de mayo de 2023, de <https://www.agenciaandaluzadelaenergia.es/es/informacion-energetica/infraestructuras-energeticas/sistema-gasista>
- Copernicus in detail | Copernicus. Recuperado 5 de abril de 2023, de <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus/copernicus-detail>
- Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo sostenible. (2020). Análisis de los Escenarios Climáticos Regionales de Andalucía (AR5). *Junta de Andalucía*.
- Comisión Europea. (2021, 18 septiembre). *Comunicado de prensa conjunto UE-EE.UU. relativo al Compromiso Mundial sobre el Metano*. European Commission. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip\\_21\\_4785](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_21_4785)
- Dalsøren, S. B., Myhre, C. L., Myhre, G., Gomez-Pelaez, A. J., Søvde, O. A., Isaksen, I. S. A., Weiss, R. F., & Harth, C. M. (2016). Atmospheric methane evolution the last 40 years. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(5), 3099-3126. <https://doi.org/10.5194/acp-16-3099-2016>
- Ellen Gray. (2018, noviembre 30). *Greenhouse Gas 'Detergent' Recycles Itself in Atmosphere: NASA Study*. NASA. <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/greenhouse-gas-detergent->

[recycles-itself-in-atmosphere-nasa-study/#:~:text=%22When%20OH%20reacts%20with%20methane,recycle%20back%20into%20the%20atmosphere.%22](#)

- Hausmann, P., Sussmann, R., & Smale, D. (2016). Contribution of oil and natural gas production to renewed increase in atmospheric methane (2007–2014): Top-down estimate from ethane and methane column observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(5), 3227-3244. <https://doi.org/10.5194/acp-16-3227-2016>
- International Energy Agency. (2021). *Curtailing Methane Emissions from Fossil Fuel Operations: Pathways to a 75% cut by 2030*. OECD. <https://doi.org/10.1787/1616ff90-en>
- Methane Matters: A comprehensive approach to methane mitigation*. (2022). Environmental Investigation Agency (EIA). <https://eia-international.org/wp-content/uploads/CM-WEB-FINAL-REPORT-SINGLE-PAGE-METHANE-MATTERS-.pdf>
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura, and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and natural radiative forcing. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Doschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, Eds., Cambridge University Press, pp. 659-740. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.018>
- Naciones Unidas. *¿Qué es el cambio climático?* United Nations. Recuperado 16 de mayo de 2023, de <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>
- Nisbet, E. G., Dlugokencky, E. J., Manning, M. R., Lowry, D., Fisher, R. E., France, J. L., Michel, S. E., Miller, J. B., White, J. W. C., Vaughn, B., Bousquet, P., Pyle, J. A., Warwick, N. J., Cain, M., Brownlow, R., Zazzeri, G., Lanoisellé, M., Manning, A. C., Gloor, E., ... Ganesan, A. L. (2016). Rising atmospheric methane: 2007–2014 growth and isotopic shift. *Global Biogeochemical Cycles*, 30(9), 1356-1370. <https://doi.org/10.1002/2016GB005406>
- Pedraza, A. C., Chona, J. A. R., Maldonado, J. I. M., & Carrillo, J. L. O. (2016). Estudio cinético de bacterias metanogénicas a diferentes temperaturas. *BISTUA REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS BASICAS*, 14(1), 38. <https://doi.org/10.24054/01204211.v1.n1.2016.1690>
- Reay, D., Smith, P., & Amstel, A. van (Eds.). (2010). *Methane and climate change*. Earthscan.
- Rice, A. L., Butenhoff, C. L., Shearer, M. J., Teama, D., Rosenstiel, T. N., & Khalil, M. A. K. (2010). Emissions of anaerobically produced methane by trees.

- Geophysical Research Letters*, 37(3), 2009GL041565.  
<https://doi.org/10.1029/2009GL041565>
- Saunois, M., Jackson, R. B., Bousquet, P., Poulter, B., & Canadell, J. G. (2016). The growing role of methane in anthropogenic climate change. *Environmental Research Letters*, 11(12), 120207. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/120207>
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., ... Zhuang, Q. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1561-1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Schaefer, H., Fletcher, S. E. M., Veidt, C., Lassey, K. R., Brailsford, G. W., Bromley, T. M., Dlugokencky, E. J., Michel, S. E., Miller, J. B., Levin, I., Lowe, D. C., Martin, R. J., Vaughn, B. H., & White, J. W. C. (2016). A 21st-century shift from fossil-fuel to biogenic methane emissions indicated by  $^{13}\text{CH}_4$ . *Science*, 352(6281), 80-84. <https://doi.org/10.1126/science.aad2705>
- Thakur, S., & Solanki, H. (2022). ROLE OF METHANE IN CLIMATE CHANGE AND OPTIONS FOR MITIGATION-A BRIEF REVIEW. *International Association of Biologicals and Computational Digest*, 1(2), 275-281. <https://doi.org/10.56588/iabcd.v1i2.80>
- Transport & Environment. (2022, 13 abril). *El metano que escapa de los barcos propulsados por gas natural agrava la crisis climática - Investigación - Transport & Environment*. <https://www.transportenvironment.org/discover/el-metano-que-escapa-de-los-barcos-propulsados-por-gas-natural-agrava-la-crisis-climatica-investigacion/>
- Zhang, Z., Zimmermann, N. E., Stenke, A., Li, X., Hodson, E. L., Zhu, G., Huang, C., & Poulter, B. (2017). Emerging role of wetland methane emissions in driving 21st century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36), 9647-9652. <https://doi.org/10.1073/pnas.1618765114>