



Facultad de ciencias

**Desarrollo y aplicación de un código en Python
para la extracción de las concentraciones de CO
atmosférico capturadas por el sensor TROPOMI
(Sentinel-5P) y su tratamiento Geoespacial en
ArcGIS: análisis comparativo de CO durante abril
de 2019, 2020 y 2021**

(Development and application of a Python code for
the extraction of atmospheric CO concentrations
captured by the TROPOMI sensor (Sentinel-5P) and
its Geospatial treatment in ArcGIS: comparative
analysis of CO during April 2019, 2020 and 2021)

Trabajo de Fin de Grado
para acceder al

GRADO EN FÍSICA

Autora: Sofía Alejandra Santos Talledo
Director: Alberto González Díez

Septiembre- 2023

Resumen

El presente trabajo de fin de grado se centra desarrollar códigos informáticos que permitan abordar problemas ambientales espaciales, con un enfoque en la comparación de las concentraciones de CO durante los meses de abril de los años 2019, 2020 y 2021. La contaminación del aire es un desafío ambiental crítico que impacta tanto en la salud humana como en el ecosistema. La medición precisa de las concentraciones de CO en la atmósfera es fundamental para monitorear y abordar la calidad del aire. El sensor TROPOMI, ubicado en el satélite Sentinel-5P, se utiliza para recopilar datos relevantes sobre la concentración de gases atmosféricos. Se ha implementado una serie de códigos para procesar y transferir estos datos a ArcGIS, lo que facilita el análisis espacial de los mismos. Estos códigos se han mostrado eficaces en la descarga de datos de TROPOMI, su importación en ArcGIS y la realización de análisis geoespaciales. La aplicación de estas herramientas ha permitido investigar la distribución espacial de las concentraciones de CO en toda Europa. Este estudio es relevante ya que contribuye al entendimiento de la calidad del aire y puede ser fundamental para la toma de decisiones en políticas ambientales. Además, los códigos desarrollados tienen potencial utilidad para otros investigadores interesados en abordar problemas ambientales espaciales diversos.

Palabras clave: concentración de CO, TROPOMI, ArcGIS, análisis espacial, calidad del aire.

Abstract

This undergraduate thesis focuses on developing computer codes to address spatial environmental issues, with a specific focus on comparing CO concentrations during the months of April in the years 2019, 2020, and 2021. Air pollution is a critical environmental challenge that impacts both human health and the ecosystem. Accurate measurement of CO concentrations in the atmosphere is essential for monitoring and addressing air quality. The TROPOMI sensor, located on the Sentinel-5P satellite, is used to collect relevant data on atmospheric gas concentrations. A series of computer codes has been implemented to process and transfer this data to ArcGIS, facilitating spatial analysis. These codes have proven effective in downloading TROPOMI data, importing it into ArcGIS, and conducting geospatial analyses. The application of these tools has allowed for the investigation of the spatial distribution of CO concentrations across Europe. This study is significant as it contributes to the understanding of air quality and can play a crucial role in shaping environmental policy decisions. Furthermore, the developed codes have the potential to be useful for other researchers interested in addressing various spatial environmental issues.

Keywords: CO concentration, TROPOMI, ArcGIS, spatial analysis, air quality.

Agradecimientos

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a Alberto González Díez, mi director de tesis, por su orientación, apoyo y dedicación a lo largo de este arduo proceso de investigación y por haberme brindado la oportunidad de adentrarme en este campo de conocimientos. Sin su compromiso y experiencia, este proyecto no habría sido posible.

Índice

1. Introducción

2. Procedimiento experimental

2.1. Área de estudio

2.2. Satélites y sensores

2.2.1. Programa Copernicus

2.2.2. Sentinel-5P y TROPOMI

2.2.3. El sensor TROPOMI y la medida del monóxido de carbono

2.2.4. Descarga de los ficheros TROPOMI empleados en el presente trabajo

2.2.5. Nomenclatura y estructura de los ficheros

2.2.6. Procesamiento de los datos en entorno SIG

2.2.7. Transformación de las lecturas puntuales de CO en un modelo de distribución

3. Resultados y discusión

3.1 Códigos diseñados para el tratamiento del problema

3.1.1. Código 1. Descarga de datos del sensor

3.1.2. Códigos 2, 3 y 4. Tratamiento archivos

3.1.3. Códigos 5, 6 y 7. Primera fase procesamiento en ArcGIS

3.1.4. Códigos 8 y 9. Fase final de procesamiento en ArcGIS

3.2. Resultados del análisis de CO

3.2.1. Abril 2019

3.2.2. Abril 2020

3.2.3 Abril 2021

3.2.4 Comparación 2019, 2020 y 2021

4. Conclusiones

Referencias

Anexo

A. Códigos

B. Mapas

1. Introducción

Uno de los problemas más relevantes de la sociedad actual, a juicio de Naciones Unidas (NU), es lo que se conoce coloquialmente por calentamiento global [1]. Si un ciudadano busca en prensa, a nivel informativo, el concepto de calentamiento global aparece a menudo como sinónimo de cambio climático, aunque son conceptos totalmente diferentes desde un punto de vista científico; como lo son el concepto de tiempo atmosférico y clima. El tiempo atmosférico se refiere a las condiciones atmosféricas que se producen localmente durante cortos periodos de tiempo, desde minutos hasta horas o días [2]. Mientras que el clima, analiza dichos cambios a largo plazo (por encima de 30 años), tanto a nivel regional como mundial [3]. Las causas de dichas variaciones a largo plazo pueden ser debidas a la actividad tectónica del planeta (movimientos continentales, erupciones volcánicas, elevación de continentes), variaciones geodinámicas (variaciones en las corrientes oceánicas o atmosféricas), cósmicas (variación de la posición de la Tierra frente al Sol, o cambios de la actividad solar como son las erupciones solares) o variaciones debidas a las actividades humanas. Por su parte, el calentamiento global, aunque es también una variación a largo plazo del clima terrestre, tiene un enfoque más concreto en el tiempo. Se trata de un calentamiento de la superficie de la Tierra observado desde el periodo preindustrial (entre 1850 y 1900). La Física de la Tierra al igual que se centra en el estudio de las variables atmosféricas, ha indagado en las causas de este incremento reciente de la temperatura del planeta. Es globalmente aceptado que dicho incremento es debido a las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles, que aumentan los niveles de gases de efecto invernadero, atrapando el calor de la atmósfera terrestre [2]. Dicho calentamiento constituye una realidad que está produciendo efectos negativos en las personas, en la economía y en la naturaleza [3].

La lucha contra el calentamiento global es imprescindible para el futuro del planeta y Europa en particular [4]. Por ese motivo la lucha contra este tipo de cambio climático constituye uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de NU y una base de referencia del Pacto Verde Europeo [5]. Con dicho pacto, la unión europea (UE) pretende la neutralidad climática de aquí al 2050. Para ello, promoverá una transición hacia un modelo de sociedad en la que no existan emisiones de gases de efecto invernadero producidos por la quema de combustibles fósiles y se mejorará la capacidad de los ecosistemas para absorber más gases de efecto invernadero. Con esta finalidad se está desarrollando un conjunto de acciones plasmadas sobre la base de normativas cuyo objetivo es reducir las emisiones de la UE en al menos un 55% de las emitidas en 1990, de aquí a 2030 (mediante el paquete de medidas denominadas Objetivo 55. [5]

Influenciada por el interés de las naciones, la ciencia está luchando contra el cambio climático. La quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas, generan emisiones de gases de efecto invernadero; siendo los principales el dióxido de carbono y el metano [3]. Así, el desarrollo tecnológico está desplegando nuevos

dispositivos que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero, transformando el CO₂, por ejemplo, en productos con multitud de aplicaciones [6]. No debe olvidarse que el CO₂ es una base para el soporte de ecosistemas vegetales; siendo las plantas un sumidero de este gas. La comunidad científica fue quien alertó a los gobiernos de los estados del calentamiento global. Así en 1979 se celebró la primera conferencia mundial sobre el clima auspiciada por sociedades científicas. En ella, se advirtió sobre el calentamiento global. Cuarenta años más tarde, un grupo de más de 11.000 científicos firmaron un manifiesto en el que se alertaba de la crisis climática [7], promoviendo cinco medidas básicas para paliar dicha crisis (Transición energética, freno de los gases contaminantes, protección de la naturaleza, cambios en la alimentación, reforma del sistema económico). A éstas hay que sumar otras medidas como la publicación de informes del cambio climático como los emitidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de Naciones Unidas. Dentro de este contexto, la medida diaria de parámetros meteorológicos como son la temperatura, precipitación, humedad, etc., junto con el seguimiento de la evolución de los gases de efecto invernadero, el desarrollo de modelos atmosféricos o de parámetros que reflejen la calidad del aire, constituye una pieza fundamental del análisis. Modelos atmosféricos como los desarrollados dentro del Instituto de Física de Cantabria (IFCA) por el grupo de meteorología y minería de datos [8].

La prueba del calentamiento global se fija en la correlación existente entre el aumento de la temperatura media global con relación al de las emisiones de gases de efecto invernadero. La temperatura media global de la Tierra registrada, desde el periodo preindustrial, ha aumentado en aproximadamente 1 grado Celsius (a razón de 0,2 grados Celsius por década). Por lo que la clave es analizar si el incremento de dichos gases y contaminantes atmosféricos es producido por la quema de combustibles fósiles.

Los estados llevan seguimientos de los parámetros de calidad del aire y evaluaciones de dicha calidad, como realiza el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico [9]. Así, por ejemplo, en España la evaluación de la calidad del aire es analizada mediante datos aportados por las comunidades autónomas y entidades locales (Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire). Por un lado, se analizan contaminantes como es el dióxido de azufre (SO₂, para protección de la salud y de los ecosistemas); dióxido de nitrógeno (NO₂, para protección de la salud); óxidos de nitrógeno (NO_x, para protección de la vegetación); partículas en suspensión de tamaño inferior a 10 µm (PM₁₀) y de tamaño inferior a 2,5 µm (PM_{2,5}); plomo (Pb); benceno (C₆H₆), monóxido de carbono (CO); ozono (O₃, protección de la salud y protección de la vegetación) y arsénico (As), cadmio (Cd), níquel (Ni) e hidrocarburos aromáticos policíclicos representados por el benzo(a)pireno [9]. Por otro lado, aquellos otros compuestos que aunque no tienen límites regulados, su concentración es preocupante, por lo que es interesante conocerla: amoníaco, depósitos totales de As, Cd, mercurio (Hg), Ni, B(a)P y otros hidrocarburos aromáticos policíclicos; mercurio gaseoso total y

mercurio gaseoso divalente; compuestos orgánicos volátiles que son sustancias precursoras del ozono [9]. Dichos valores son medidos mediante redes de seguimiento. Así, para el caso de Cantabria, los valores son registrados en 11 estaciones, irregularmente repartidas por el territorio [10]. Evidentemente, el problema que plantea hacer uso de este tipo de registros es su distribución espacial. Por ejemplo, solo una de las once estaciones de seguimiento de Cantabria está situada en una zona puramente agraria;; diez de los registros se localizan en la zona central de la región muy industrializada, no hay valores en áreas naturales dentro de la red de parques de la región; por lo que las medidas regionales dan reflejo de en qué medida la influencia de la componente humana contribuye a la producción de contaminantes antrópicos

La solución al problema de la distribución espacial de contaminantes proviene de la teledetección y del empleo de satélites de observación terrestre [2]. Los satélites están desempeñando un papel cada vez más importante en el seguimiento de la contaminación del aire en todo el mundo. Equipados con sensores especializados que pueden detectar y medir contaminantes; transmiten sus datos a estaciones terrestres, donde se pueden analizar y utilizar para rastrear el movimiento de los contaminantes a lo largo del tiempo. Esta información se puede utilizar para identificar áreas de alta contaminación, desarrollar estrategias para reducir las emisiones o monitorear la efectividad de las medidas de control de la contaminación, o simplemente posicionar las áreas donde se pueden necesitar medidas adicionales.

Los primeros satélites para la observación de la atmósfera terrestre (Vanguard 2) fueron lanzados a finales de la década de 1950, por los Estados Unidos. Solo eran capaces de medir la capa de nubes; presentando además problemas de almacenamiento de datos y supervivencia. El TIROS-1, lanzado por la NASA en 1960, sucedió al programa Vanguard; pero tuvo una vida muy corta de menos de tres meses. Posteriormente, comenzó el programa Nimbus, cuya tecnología y técnicas han sido heredadas por la mayoría de los satélites de observación de la NASA y la NOAA [11]. Básicamente los satélites de observación de la atmósfera se dividen en los de órbita geoestacionaria o polar. Los primeros son los más populares, orbitan a altitudes de 35.800 km sobre el ecuador, mostrando una posición estática respecto al movimiento de rotación terrestre, por lo que son capaces de observar la misma porción del territorio terrestre. Dentro de este apartado se encuentran los satélites americanos GOES-11 (llamado GOES EAST, situado a sobre la vertical del río Amazonas) y GOES 12 (llamado GOES WEST, situado sobre la vertical del pacífico). Otros países como Japón (con el MTSAR-1R), Rusia (con el GOMS), China (con el Fengyun), Europa (Envisat) o India, también disponen de satélites meteorológicos geoestacionarios. Los más populares de los que transcurren por una órbita polar son los siete americanos del programa NOAA (NOAA-12 al NOAA-18). En cuanto al programa europeo, cabe señalar que está liderado por la serie Meteosat. El primero se lanzó a finales de la década de 1970 del siglo pasado. La red europea conforman un conjunto de plataformas geoestacionarias que sobrevuelan el Atlántico

desarrolladas por la Agencia Espacial Europea (ESA). Este programa está compuesto por tres generaciones de satélites. Las dos primeras generaciones (Meteosat-1 al Meteosat-11) están siendo remplazados por la tercera generación compuesta por seis plataformas (MTG-I1 al MTG-S2). A esta cobertura hay que sumar la red de satélites de seguimiento ambiental *Copernicus* de la Unión Europea. *Copernicus* es una constelación de siete satélites. En concreto Sentinel 5P, tiene la misión de observar la contaminación atmosférica. A bordo del Sentinel 5P va el espectrómetro denominado TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), el cual mediante la medida de emisiones en longitudes de onda que van desde el ultravioleta (UV), visible (VIS), infrarrojo cercano (IR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), es capaz de monitorizar gases como ozono, metano, formaldehído, aerosol, monóxido de carbono, NO₂ y SO₂ en la atmósfera. Este mismo sensor ha sido objeto de otros TFGs realizados en esta facultad con anterioridad. La novedad del presente trabajo se centra en el estudio exclusivo del monóxido de carbono (CO) detectado a través de este instrumento.

El CO es un gas inodoro e incoloro, que procede de la combustión incompleta de cualquier combustible que contenga carbono (petróleo, metano, carbón, madera, biocombustibles, etc.). Por tanto, la primera fuente de emisión son los procesos industriales o el tráfico; pero también los procesos no industriales, como los agropecuarios, o las erupciones volcánicas. El CO constituye uno de los gases de efecto invernadero, con una vida media en la atmósfera de tres meses (oxidándose progresivamente y dando lugar a CO₂), y progresivamente a O₃. Dado que la masa molecular del CO (28,0 g/mol) es ligeramente menos densa que el aire posee facilidad de ascender en la atmósfera. La medición de CO se realiza a través de espectrografía. Como es conocido el monóxido de carbono se mide, fundamentalmente, a través de la absorción de radiación infrarroja (IR). Por tanto, la variación de intensidad es proporcional a la concentración de monóxido de carbono en el medio. Así, un sensor mide la variación de la radiación de luz y convierte este valor en una medida proporcional de la concentración de CO presente en el aire. La unidad de medida por la que se expresan las concentraciones de monóxido de carbono en la atmósfera es el miligramo por metro cúbico (mg/m³). La actividad humana es, sin duda, la que más contribuye a la generación de CO con un 80%. La influencia antrópica genera 60 veces, o más, la cantidad de dióxido de carbono que liberan los volcanes cada año [12]. Solamente las erupciones violentas de grandes dimensiones pueden igualar la tasa de emisiones de las actividades antrópicas. No obstante, estos fenómenos naturales son muy poco frecuentes, y muy breves en comparación los anteriores. De hecho, varios estados de los Estados Unidos emiten individualmente más dióxido de carbono en un año que todos los volcanes del planeta combinados [12, 13, 14, 15]. Al tratarse de un gas ligero, es peligroso para los seres vivos. Desde un punto de vista sanitario el CO penetra en el organismo a través de los pulmones, provocando una disminución en la capacidad de la sangre de transportar oxígeno a las células. La falta de oxigenación de los tejidos produce disfunciones cardíacas, daños en el sistema nervioso. Desde un punto de vista legislativo, el valor de

concentración límite de CO para las personas es de $10\text{mg}/\text{m}^3$. Sin embargo, como se ha comentado, el monóxido de carbono no es tóxico para las plantas, ya que se oxida rápidamente convirtiéndose en dióxido de carbono, sustancia que las plantas utilizan para su fotosíntesis.

El tratamiento de la medida de contaminantes atmosféricos, gracias al satélite Sentinel 5P, ya ha sido tratado en un Trabajo de Fin de Grado (TFG) de esta Facultad, para el análisis de la contribución las erupciones volcánicas al incremento de los contaminantes en la atmósfera [16]. Existen códigos en varios lenguajes de programación [17] que facilitan la descarga de los datos de contaminantes procedentes del sensor TROPOMI y muestran sus variaciones espaciales. No obstante, los datos solo se pueden representar dentro de un entorno gráfico restringido, lo que dificulta la aplicación de análisis espaciales serios, como los que se pueden llevar a cabo dentro del entorno de un Sistema de Información Geográfica (SIG). Por tanto, resulta de interés desarrollar códigos en abierto que permitan llevar a cabo dichos tratamientos. La hipótesis del presente estudio es que es posible desarrollar códigos en Python, basados en los propuesto por la NASA para el programa Applied Remote Sensing Training (ARSET), que permitan su incorporación dentro de programas SIG. Por tanto, la meta del siguiente trabajo es desarrollar dichos códigos y posteriormente probar su capacidad para analizar problemas ambientales espaciales, como los generados a lo largo de un continente.

Para probar la capacidad del código se puede analizar en qué medida es útil en el análisis de problemas ambientales. Como es conocido durante 2020 el planeta ha sufrido una de las pandemias más importantes, causada por el virus SARS-CoV-2. La crisis comenzó en diciembre de 2019 y se desarrolló a lo largo de 2020. Es precisamente durante ese año 2020, en el que muchos gobiernos lucharon contra el virus confinando a la población en sus hogares. Fruto del confinamiento se produjo una reducción de las actividades humanas que se tradujo en: una reducción de los desplazamientos de la población (reduciéndose los contaminantes procedentes del transporte); y una limitación de la actividad industrial. Se podría asumir así que todos estos factores han conducido a una reducción de la producción antrópica del CO [18]. Por tanto, si se comparan las medidas tomadas por el sensor TROPOMI para el mes de abril de 2020, con su precedente de 2019 o con el de 2021, dentro del ámbito europeo, se debe ser capaz de medir los cambios de este contaminante en la atmósfera y analizar la bondad del código desarrollado para llevar a cabo evaluaciones ambientales dentro del calentamiento global.

Siguiendo con la línea argumental planteada, gracias a dicho código será posible cartografiar las concentraciones de este contaminante en Europa en varios países y analizar su evolución temporal, correlacionándola con la presencia del contaminante en diferentes territorios de Europa.

Un conjunto de objetivos específicos o metas a corto plazo (*checkpoints*) deben cumplirse para finalmente llegar a la obtención de la cartografía. Estos son:

- Diseño de una programación que permita la descarga de la información para una efeméride y territorio geográfico concreto.
- La importación de dichos datos a un SIG, selección de los más relevantes para el análisis
- Creación de modelos espaciales que muestren la distribución del CO a lo largo del territorio, para cada efeméride analizada.
- Creación de modelos generales que ilustren del cambio producido en el contaminante a lo largo del tiempo y para territorio.

2. Procedimiento experimental

En procedimiento experimental descrito en este apartado ilustra cómo se han medido los niveles de CO en los países más industrializados de Europa durante el mes de abril de los años 2019, 2020 y 2021. Dichos datos han sido obtenidos mediante registros tomados por el satélite Sentinel-5P, más concretamente por el espectrómetro TROPOMI.

También se describe la misión Sentinel-5; y su dispositivo de medida, el rango de medidas que puede efectuar y sus precisiones. Posteriormente se detalla la estructura de los datos registrados por el sensor y cómo se transforman para su procesamiento espacial. Por último, se muestran las bases del procedimiento de interpolación empleado para obtener un modelo de distribución espacial de la concentración de CO en el entorno europeo, empleando un Sistema de Información Geográfica.

2.1. Área de estudio

Las medidas de CO obtenidas del sensor TROPOMI corresponden con una zona de Europa comprendida entre los 30°E y los 21°W de longitud y entre los 30° y 71° de latitud N, tal y como se presenta en la Figura 1. La elección de este área geográfica ha sido principalmente debida a que estos países europeos cuentan con un grado muy elevado de industrialización y la densidad de producción industrial es importante frente a otras zonas del planeta. En consecuencia, su producción de gases y aerosoles es muy relevante en comparación con otros lugares que cuentan con menos industria-

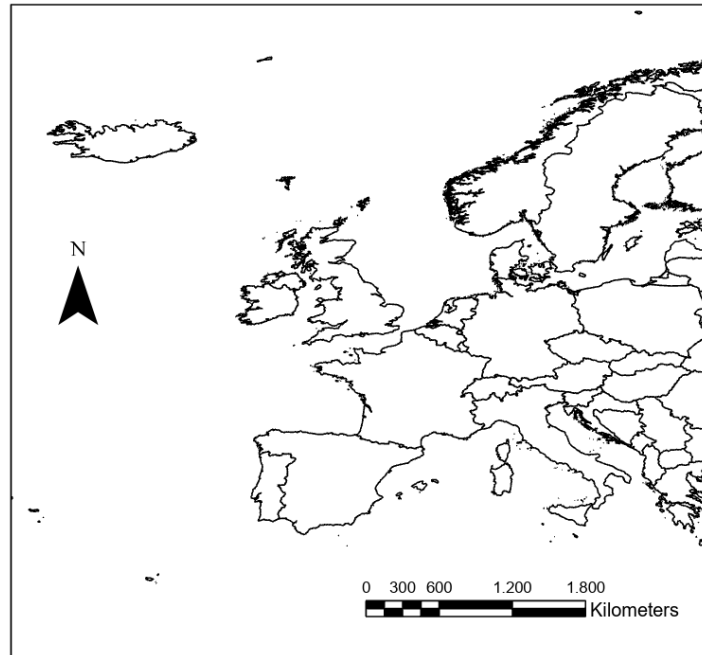


Figura 1. Área geográfica del estudio, correspondiente al continente europeo comprendida entre los 30°E y los 21°W de longitud y entre los 30° y 71° de latitud N.

Además otro factor que se ha tenido en cuenta para seleccionar este territorio es que dado que el satélite Sentinel-5P sigue una órbita geoestacionaria baja, tal y como se explicará más adelante, las lecturas de TROPOMI pueden recubrir un territorio amplio en cada pasada. Así, la franja condatos que es capturada en cada pasada engloba varios países europeos debido a su proximidad. Esto facilita la obtención de los datos, puesto que se reduce el número de archivos que hace falta descargar y procesar.

Otro componente de gran peso en la elección del territorio europeo ha sido el seguimiento de políticas y actuaciones gubernamentales similares y bien documentadas, que facilitan la correlación entre los datos tomados por el satélite y la actividad industrial del país. En el presente trabajo se han tomado los datos registrados por el Satélite correspondientes a los meses de abril del año en el que la crisis de la COVID-19 azotó por primera vez, y con más intensidad al territorio europeo (abril de 2020). Se han tomado los datos de abril del año 2020, así como los correspondientes al mismo mes para el año precedente (2019) y del año posterior (2021). Se debe recordar que durante el periodo del COVID en los diferentes gobiernos se tomaron medidas similares de confinamiento, que afectaron a la reducción drástica de la producción industrial y a la movilidad, por ejemplo se restringieron los desplazamientos de vehículos, que bajaron a valores mínimos en los lugares con cuarentena obligatoria ya que no se podía salir de casa. También se limitó la producción industrial a excepción de aquellas actividades estrictamente necesarias. Sin embargo, dichas limitaciones no tuvieron la misma contundencia ni se aplicaron simultáneamente en los mismos países, tal y como se

puede observar en la Tabla 1 por lo que puede ser interesante tratar de comparar si los valores de emisiones de CO detectan dichas diferencias nivel geográfico.

Tabla 1. Medidas de restricción impuestas por la COVID-19 en los diferentes países objeto de análisis, indicando la fecha de inicio, duración y tipo de medida aplicada. [19].

País	Fecha de inicio	Duración	Medidas impuestas
España	14 de marzo de 2020	3 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Italia	9 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, cierre de escuelas, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Francia	17 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, cierre de escuelas, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Alemania	22 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Reino Unido	23 de marzo de 2020	3 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas en espacios públicos.
Portugal	18 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Grecia	23 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Suecia	N/A	N/A	No se implementó un confinamiento obligatorio, se recomendaron medidas de distanciamiento social y trabajo remoto.
Países Bajos	15 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Bélgica	18 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Austria	16 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Suiza	16 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.

Dinamarca	11 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, cierre de escuelas, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Noruega	12 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Suecia	N/A	N/A	No se implementó un confinamiento obligatorio, se recomendaron medidas de distanciamiento social y trabajo remoto.
Finlandia	27 de marzo de 2020	1 mes	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
Polonia	25 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.
República Checa	16 de marzo de 2020	2 meses	Cierre de negocios no esenciales, restricciones de movimiento, distancia social, uso obligatorio de mascarillas.

2.2. Satélites y sensores

Tal y como se ha comentado en la introducción, las medidas de CO del presente estudio se han obtenido a partir de los datos recogidos por el satélite de observación terrestre Sentinel-5P del programa *Copernicus*, el cual cuenta con el espectrómetro (TROPOMI). Este tipo de satélites realizan la toma de medidas desde una determinada órbita, cuya elección depende de los objetivos de la misión y de los parámetros que se desean observar. Los satélites Sentinel 5P se utilizan para una amplia gama de aplicaciones, como el seguimiento de fenómenos climáticos, la monitorización de la calidad del aire, la modelización del clima, el análisis de la capa de ozono, la recopilación de datos para la predicción del clima, la monitorización del medio ambiente y muchos otros aspectos relacionados con la meteorología y el medio ambiente. Además pueden obtener datos de forma continua y en tiempo real de todo el planeta, lo que permite una cobertura global y la observación de fenómenos a gran escala, como analizar tendencias y cambios en los patrones atmosféricos, lo que resulta fundamental para comprender el cambio climático y sus efectos. [20] [21] [22] [23]

2.2.1. Programa *Copernicus*

El programa espacial Copernicus está dirigido y coordinado por la Unión Europea y se encarga de la observación de la Tierra [21] [23]. Es gestionado por los estados miembros, la Agencia Espacial Europea (ESA), la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT), el Centro Europeo para Pronósticos Meteorológicos de

Rango Medio (ECMWF), el Mercator Océan International (MOi) y otras organizaciones no gubernamentales de la UE. [24]. Sentinel es un proyecto multisatélite compuesto por seis misiones. Sentinel-1, proporciona imágenes de radar terrestres y oceánicas durante todo el tiempo, tanto de día como de noche. Sentinel-2, proporciona imágenes ópticas terrestres de alta resolución para servicios terrestres (monitorización de la vegetación, la cobertura de suelo y agua, las vías navegables interiores y las zonas costeras, etc.); Sentinel-3, proporcionará servicios globales de vigilancia terrestre y oceánica; Sentinel-4, embarcado en el nuevo Meteosat proporcionará a partir de 2024 datos para la vigilancia de la composición atmosférica; Sentinel-5, es el que lidera actualmente el programa de vigilancia de la composición atmosférica, y proporciona observaciones de la calidad del aire; Sentinel-6, proporciona medidas altimétricas de precisión. El primero de estos satélites Sentinel-1 fue puesto en órbita en 2014 y a partir de entonces han seguido los lanzamientos, mientras que Sentinel-4 será puesto en órbita en el primer trimestre de 2024.

Los satélites Sentinel poseen una órbita terrestre baja (Low Earth Orbit, LEO en inglés), permitiéndoles llevar a cabo observaciones de la superficie terrestre detalladas y obtener imágenes de alta resolución [24]. Las órbitas LEO se sitúan entre 160 y 1.000 km sobre la superficie terrestre (Figura 2)

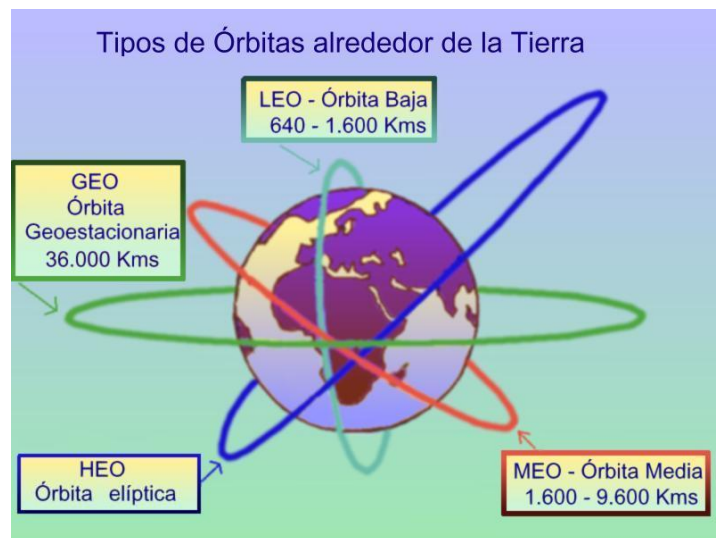


Figura 2. Tipos de órbitas satelitales alrededor del planeta Tierra dependiendo de la altura a la que orbitan y de sus características. Se puede observar que se han representado 4 de ellas, siendo LEO la más baja y GEO y HEO las superiores. Fuente [24].

Los satélites localizados en dichas órbitas tienen un periodo orbital corto, de entre 90 y 120 minutos, por lo que pueden dar la vuelta al planeta hasta 16 veces al día. Además, los datos pueden obtenerse y transmitirse rápidamente. Sin embargo, justamente

debido a su proximidad a la Tierra, tienen un área de cobertura menor que otros tipos de satélites.

Copernicus no es solo un programa espacial, también recoge información de estaciones terrestres que permiten la calibración de los datos obtenidos por los sensores espacioportados. Los datos de Copernicus cuentan con una decena de años de capturas continuas del territorio planetario permitiendo realizar comparaciones y búsquedas además de monitorear cambios, examinar patrones que pueden ser creados para mejorar pronósticos por ejemplo atmosféricos o marítimos, observar anomalías, extraer información estadística o crear mapas a partir de las imágenes.

La información proporcionada por Copernicus puede ser usada para una amplia gama de aplicaciones en diferentes áreas que van desde la ecología, la geología, la agricultura, protección civil, seguridad y gestión de crisis y emergencias, infraestructura, transporte y movilidad, monitorización del cambio climático, etc. De hecho, los principales usuarios de los servicios de Copernicus son las autoridades públicas y los responsables políticos que necesitan recoger información para poder desarrollar políticas y legislaciones medioambientales o para tomar decisiones críticas en situaciones de emergencia, como desastres naturales o crisis humanitarias. [25]

Más concretamente se puede realizar una clasificación de las actividades de Copernicus de acuerdo a 6 de sus servicios [26]:

- Servicio de Vigilancia Atmosférica Copernicus (CAMS)
- Servicio de Vigilancia Marina Copernicus (CMEMS)
- Servicio de Vigilancia Terrestre Copernicus (CLMS)
- Servicio Cambio Climático de Copernicus (C3S)
- Servicio de Gestión de Emergencias de Copernicus (CEMS)
- Servicio de Aplicaciones de Seguridad de Copernicus

2.2.2. Sentinel-5P y TROPOMI

Como se ha indicado anteriormente, dentro de la misión Sentinel-5 se encuentra la misión Copernicus Sentinel-5P o Precursor (Figura 3). Esta es la primera misión de Copernicus dedicada a monitorear nuestra atmósfera. Persigue el estudio de la calidad del aire, el ozono, radiación ultravioleta o el monitoreo y la predicción del clima.

Este satélite es el resultado de la colaboración entre la ESA, la Comisión Europea, la industria, los usuarios de datos, y un consorcio de instituciones y organismos holandeses entre los que se encuentran la Oficina Espacial Holandesa NSO (antes NIVR), el Real Instituto Meteorológico Holandés KNMI, el Instituto Holandés de Investigación Espacial SRON, TNO y Dutch Space. Su construcción se desarrolló en Reino Unido por la empresa Astrium. Pero también entre otras agencias espaciales internacionales como se comentará posteriormente.

Desde un punto de vista orbital, posee una órbita sincrónica con el Sol casi polar, con un cruce ecuatorial del nodo ascendente a las 13:30 h (hora solar local media); la distancia angular entre el plano de la órbita y el ecuador (inclinación de la órbita) es de tipo alto ($98,7^\circ$) [27]. La razón por la que realiza esta órbita es porque así, la superficie de la Tierra observada está siempre iluminada con el mismo ángulo solar. La resolución temporal del satélite, o tiempo que tarda el satélite en pasar por el mismo punto geográfico de la Tierra, es de 16 días. No obstante, el satélite realiza 14 órbitas a la Tierra por día, o lo que es casi unas 227 órbitas por ciclo [27], es decir, hace 222 órbitas para pasar por el mismo punto geográfico. Su hora local facilita la colaboración con datos de satélites procedentes de otras agencias, como los aportados por el satélite Suomi-NPP (National Polar-orbiting Partnership) de la NASA/NOAA. El satélite Suomi-NPP aporta datos de máscara de nubes co-localizados, que son de mayor resolución espacial que la máscara de nubes calculada a partir de los datos de Sentinel-5P. Para llevar a cabo dicho aprovechamiento de la órbita, Sentinel-5P hace que se sitúe detrás de Suomi, en 3,5 minutos en el Nodo Ascendente de Tiempo Local (LTAN), lo que permite que la franja de observación de Sentinel-5P permanezca dentro de la escena observada por Suomi.

Sentinel-5P fue lanzado el 13 de Octubre de 2017, desde el cosmódromo de Plesetsk (Mirny, Rusia) por Eurockot Launch Services GmbH. Los primeros datos fueron publicados el 10 de Julio de 2018 [26] [27].

El Sentinel 5P (S5P, 'precursor') posee un peso de 820 kg (incluyendo 82 kg de combustible) construido por Airbus Defence and Space del Reino Unido para la ESA usando la plataforma Astrobus 250 (AstroSat 250). Sus dimensiones son de 3,35 metros de alto y 5,63 metros de diámetro. Dispone de tres paneles solares que generan 1.500 vatios de potencia y su vida útil se estima en un mínimo de siete años (lleva combustible para diez años) [27].

La plataforma consta de un satélite que lleva un Instrumento de seguimiento de la troposfera (TROPOMI) integrado en la plataforma (Figura 4), el cual fue cofinanciado por la ESA y los Países Bajos. Esta misión reduce las brechas en la disponibilidad de productos de datos atmosféricos globales pertenecientes a otros sensores entre los que se encuentran SCIAMACHY/Envisat (que finalizó en abril de 2012), la misión OMI/AURA y las futuras misiones Copernicus Sentinel-4 y Sentinel-5. [27]



Figura 3. Imagen artística del satélite Sentinel-5P sobrevolando la Tierra en una órbita LEO. Fuente ESA.

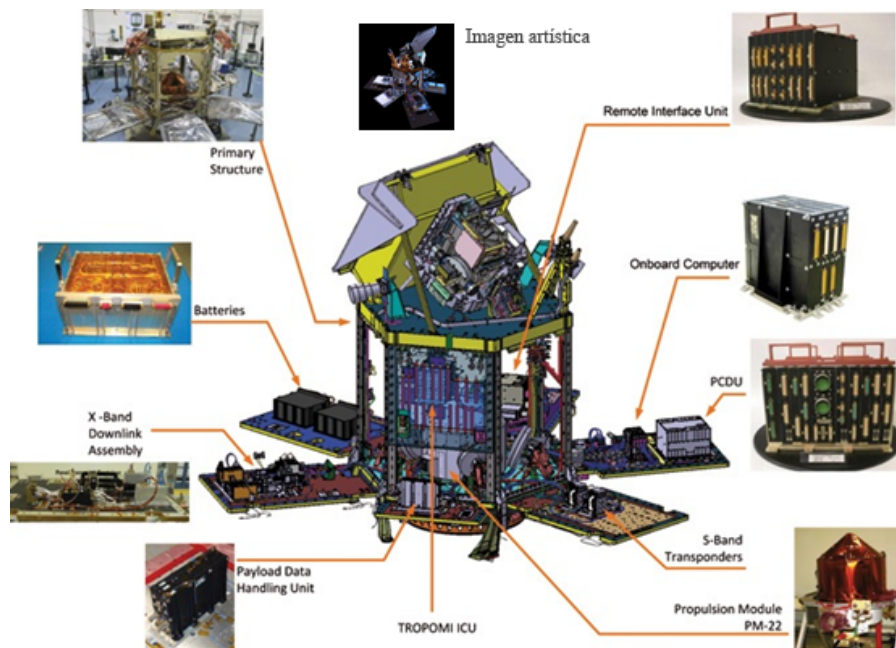


Figura 4. Imagen de las diferentes partes que componen el satélite Sentinel-5P, mostrando la situación del sensor TROPOMI dentro de la plataforma hexagonal de lanzamiento. Fuente ESA.

2.2.3. El sensor TROPOMI y la medida del monóxido de carbono

Como se ha indicado anteriormente El Sensor TROPOMI es una pieza fundamental de la misión Sentinel-5P para la medida de precisión de los niveles de diversos gases

atmosféricos, aerosoles y otros compuestos químicos que influyen en la calidad del aire y el cambio climático. Una de las principales peculiaridades del sensor es que utiliza el principio de la espectroscopia de absorción para analizar la composición química de la atmósfera terrestre. Esta técnica se basa en la capacidad de los gases presentes en la atmósfera para absorber energía en determinadas longitudes de onda de la luz solar. Al medir las diferencias en la cantidad de luz absorbida a diferentes longitudes de onda, el TROPOMI puede identificar y cuantificar la concentración de diversos gases, como dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, metano y monóxido de carbono.

TROPOMI destaca por su excepcional resolución espacial, capaz de proporcionar imágenes detalladas de la superficie terrestre con un nivel de precisión sin precedentes. Esto permite identificar fuentes de emisión de gases contaminantes y analizar su distribución geográfica con gran detalle, lo que resulta crucial para la toma de decisiones en políticas ambientales. El sensor cuenta con un amplio campo de visión, lo que significa que puede escanear grandes áreas de la Tierra en una sola pasada. Esto es esencial para cartografiar la distribución de los gases y aerosoles en la atmósfera en diferentes momentos del día y en diversas condiciones meteorológicas. El sensor dispone de una óptica avanzada. Su diseño óptico le garantiza mediciones precisas y consistentes a lo largo del tiempo. Además, la tecnología de dispersión utilizada en el sensor permite discriminar entre distintos tipos de aerosoles y partículas presentes en la atmósfera. Es importante destacar que realiza mediciones continuas y globales de la atmósfera terrestre. Esto proporciona información esencial para comprender las variaciones temporales y espaciales de los contaminantes atmosféricos, así como para identificar tendencias a lo largo del tiempo.

Desde un punto de vista técnico, TROPOMI posee las siguientes características: a) una visión vertical descendente (Nadir viewing); b) tiene una resolución espectral amplia (Figura 5), que cubre cuatro rangos espectrales que parten desde el ultravioleta, UV (de 270 a 320 nm), pasando por el ultravioleta en frontera con el visible, UVIS (de 320 a 495 nm), el infrarrojo cercano, NIR (de 675 a 775 nm) y el infrarrojo de onda corta o SWIR (de 2305 a 2385 nm); c) Se trata de un dispositivo de barrido (sin escaneo) con un ancho de barrido de ~ 2600 km en la superficie de la Tierra (los datos aportados comprenden un rango de latitudes que oscila entre los 7° N y 7° S); d) el tamaño típico de los píxeles cerca del nadir (Figura 6), será de $7 \times 3,5 \text{ km}^2$ para todas las bandas espectrales, con la excepción de la banda UV1 ($7 \times 28 \text{ km}^2$) y las bandas SWIR ($7 \times 7 \text{ km}^2$); e) el instrumento utiliza técnicas de teledetección pasiva para medir la radiación solar reflejada y radiada por la Tierra al techo de la atmósfera (TOA). [28]. [29] [30] [31].

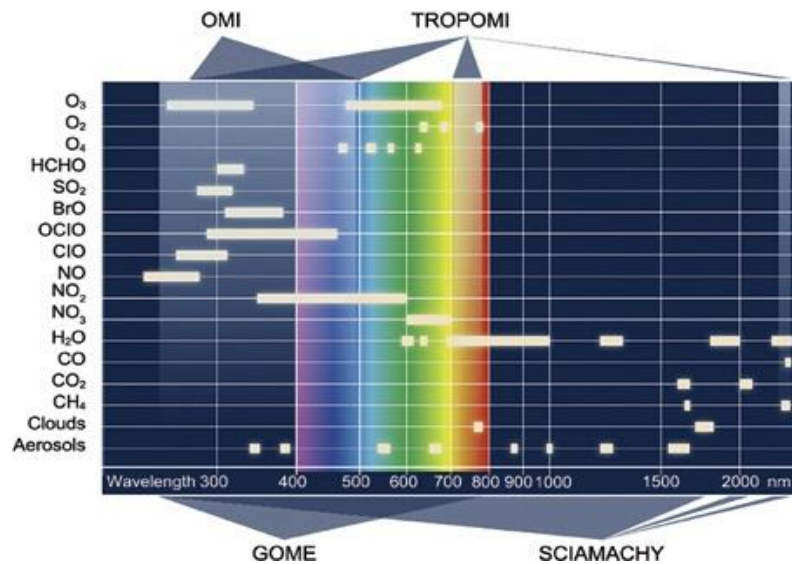


Figura 5. Rango espectral de TROPOMI en comparación con el sensor OMI y componentes atmosféricos detectados. Fuente ESA.

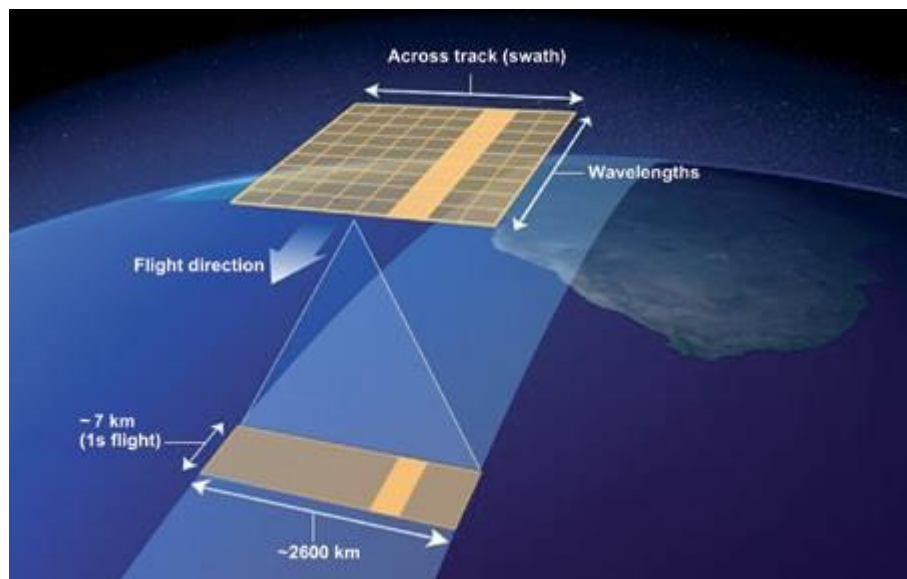


Figura 6. Resolución espacial del sensor TROPOMI. Fuente ESA.

Existen diversos conjuntos de datos relacionados con los tres niveles de procesamiento del Sensor TROPOMI [16] [32]:

(a) Nivel 0: Esta categoría de datos no está disponible al público en general. Contiene los datos directamente registrados por los cuatro receptores, organizados cronológicamente, tanto de las mediciones atmosféricas como de las de calibración.

También incluye información sobre el estado de los componentes del satélite, posiciones espaciales, etc. [32].

(b) Nivel 1B: Los datos de este conjunto corresponden a medidas radiométricas y abarcan tanto las radiancias de todas las bandas espectrales registradas a nivel del techo de la atmósfera (TOA, por sus siglas en inglés), como las irradiancias solares. Estos datos están geolocalizados y han sido corregidos radiométricamente, estando disponibles para el público en general [32].

(c) Nivel 2: Estos datos incluyen, por un lado, las columnas totales verticales geolocalizadas de ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehídos y metano. También se incorporan las columnas verticales troposféricas geolocalizadas de dióxido de nitrógeno, así como el perfil vertical geolocalizado de ozono. Además, se proporciona información geolocalizada sobre nubes y aerosoles, el índice de absorción de aerosoles y la altura de la capa de aerosoles. Todos estos productos son de acceso público [32].

A su vez, se identifican tres tipos diferentes de procesamiento de datos:

(a) NRT (Tiempo Casi Real): Los datos procesados con esta metodología están disponibles tres horas después de su captura. Esto incluye las columnas totales de ozono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehídos, perfiles verticales de ozono e información sobre nubes y aerosoles [32].

(b) OFFL (Fuera de Línea): Los datos procesados bajo esta modalidad están disponibles con un cierto retraso que depende del tipo de producto en cuestión. Por ejemplo, los datos de nivel 1B pueden descargarse después de 12 horas desde la medición. No obstante, cuando se requieren datos de metano, ozono o las columnas totales de dióxido de nitrógeno, es necesario esperar 5 días para su descarga [32].

(c) Reprocesamiento: En este caso, no existen limitaciones temporales. El reprocesamiento de los productos del Sentinel-5P se lleva a cabo cuando se consideran necesarias actualizaciones significativas de los mismos [32].

Uno de los gases que el Sensor TROPOMI puede medir con precisión es el monóxido de carbono (CO). Recordemos que el monóxido de carbono, está presente de forma natural en la atmósfera de la Tierra en concentraciones muy bajas (por ejemplo, en la troposfera su valor puede rondar 100 ppb (partes por billón), es decir, partes por mil millones, mientras que en zonas urbanas pobladas sus valores están en torno a 10 ppm (partes por millón),- y en zonas con tráfico intenso puede llegar a 50 ppm. [33]. Algunas fuentes naturales terrestres de CO pueden ser los volcanes o los incendios forestales, aunque la mayor contribución de este gas a la atmósfera es debida a la actividad humana, especialmente a las emisiones de vehículos [34]. Además se produce también en ciertos procesos industriales y durante la combustión de combustibles fósiles y biomasa, como se ha indicado en la introducción. De hecho, frecuentemente es un producto de una combustión incompleta en caso de que no haya suficiente oxígeno o demasiado carbono.

[35]. Cuando es liberado al ambiente puede permanecer en la atmósfera entre 2 y 3 meses y al reaccionar con oxígeno (O_2) convirtiéndose en dióxido de carbono (CO_2). Además, también puede llegar a reaccionar en la troposfera con ciertos gases que por lo general interaccionarían el metano y el ozono, contribuyendo así también de forma indirecta a elevar la concentración de estos gases de efecto invernadero. Su triple enlace covalente entre los átomos de carbono y oxígeno es particularmente fuerte, lo cual hace que el CO sea bastante poco reactivo. Debido a esto, muchas veces tarda más en acabar de mezclarse completamente con otros gases en la troposfera de lo que sobreviven las moléculas típicas de CO antes de ser oxidadas en CO_2 , por lo que suele concentrarse cerca de sus fuentes de emisión o bien en sumideros.

La medición de monóxido de carbono mediante el TROPOMI involucra un proceso complejo que se desarrolla a través de los siguientes pasos:

1. Absorción de Luz: Cuando la luz solar atraviesa la atmósfera y llega al sensor, el monóxido de carbono presente en la atmósfera absorbe energía a longitudes de onda específicas de la luz infrarroja. Esta absorción de energía es única para cada gas y actúa como una huella dactilar química que permite identificar y cuantificar la concentración de monóxido de carbono en la atmósfera.
2. Espectroscopía Diferencial de Absorción (DOAS): El Sensor TROPOMI utiliza una técnica llamada espectroscopía diferencial de absorción (DOAS) para analizar la cantidad de luz absorbida por el monóxido de carbono. La DOAS compara la luz solar antes y después de atravesar la atmósfera, permitiendo la detección precisa de las longitudes de onda específicas que han sido absorbidas por los gases.
3. Modelado Atmosférico: Para obtener mediciones precisas de monóxido de carbono, el TROPOMI también tiene en cuenta factores como la altitud, la temperatura y la presión atmosférica en su análisis (datos aportados por las estaciones en tierra). Estos parámetros influyen en la forma en que la luz interactúa con la atmósfera y deben ser tenidos en cuenta para obtener mediciones precisas y confiables.

2.2.4. Descarga de los ficheros TROPOMI empleados en el presente trabajo

Para realizar la descarga de los ficheros de datos de TROPOMI se puede acceder a Copernicus Open Access Hub (Figura 7) a través del enlace <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>. Desde ahí, se seleccionan los diferentes parámetros deseados para las medidas: la localización espacial, la fecha en la que fueron tomadas, el tipo de producto, el nivel de procesamiento y si son tomados en tiempo real o no. Los ficheros incluyen dos tipos de información temporal: "sensing date", que hace referencia a cuándo fueron tomados los datos y "Ingestion date", que indica la fecha en la que los fueron publicados e incluidos en la base de datos.

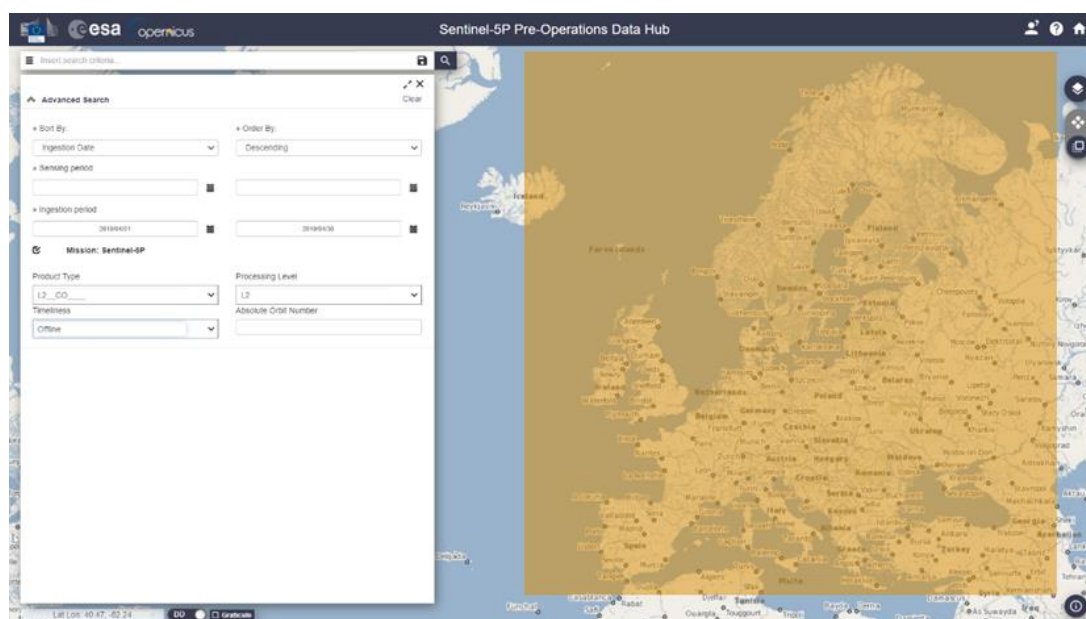


Figura 7. Acceso a los datos del presente trabajo a través del portal, *Copernicus Open Access Hub*.

Hay que tener en cuenta que Open Access Hub proporciona acceso síncrono a los datos más recientes y acceso asíncrono a los datos históricos. Los productos que están en acceso síncrono son los del último mes, y su disponibilidad para poder descargarlos a través de la URL es inmediata. Por otro lado, se brinda acceso asíncrono a todos los datos históricos, de forma que se pueden descargar al cabo de 1 hora desde su solicitud y están disponibles durante los siguientes 3 días como mínimo (Figura 8). En el presente trabajo, de acuerdo con el enfoque de este estudio, se han empleado productos de nivel 2 (Level 2, L2) que son los de acceso público, y se ha optado por el procesamiento OFFL (que indica que no son datos tomados en tiempo real, "Offline"). Concretamente, se ha trabajado con las columnas verticales totales de monóxido de carbono.

Existen varios procedimientos para la selección de los ficheros a descargar. Una opción sencilla de aplicar es proceder a la descarga individual de los ficheros. Se debe tener presente que la descarga, uno a uno, de los archivos puede tomar mucho tiempo, por el número y tamaño de los mismos. En caso de requerir una descarga de múltiples ficheros una opción interesante es la de desarrollar un código en lenguaje Python. En el presente trabajo se presenta el Código 1 (ver Anexo) desarrollado para la descarga masiva de ficheros con los fines perseguidos en el trabajo. Mediante este código, únicamente se han de ajustar los parámetros antes mencionados, e indicar dónde se quiere guardar en el ordenador antes de ejecutarlo.

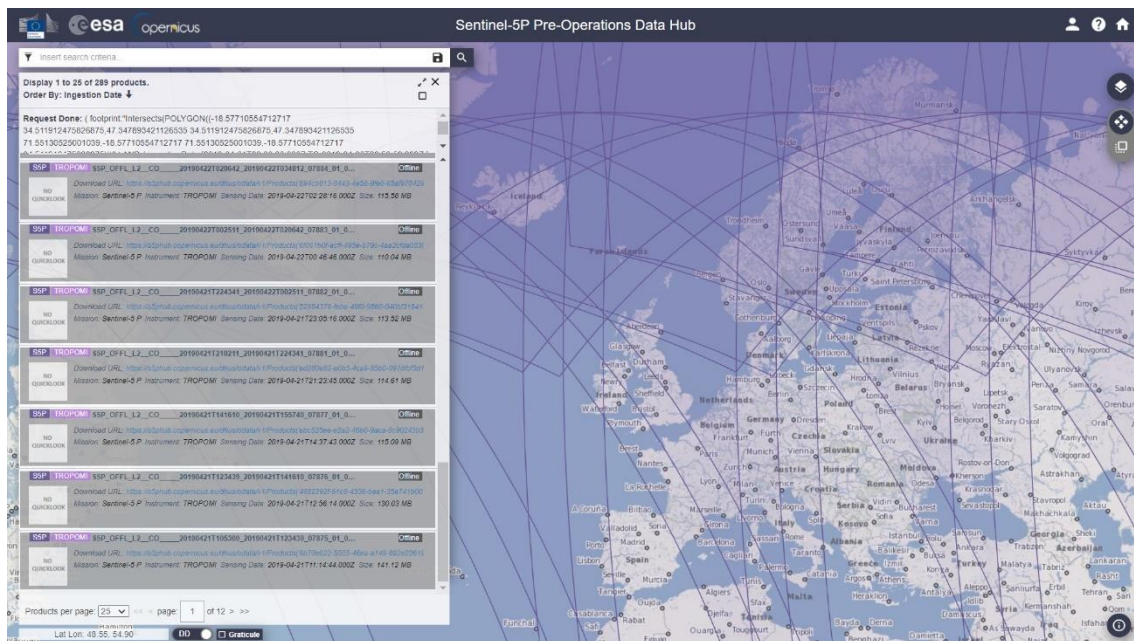


Figura 8. Acceso a los tipos de datos que presentan el recubrimiento geográfico seleccionado. Ejemplo del presente trabajo a través del portal, *Copernicus Open Access Hub*.

El código desarrollado para la descarga posee varias secciones que serán descritas en el apartado de Resultados. También se emplea otro inspirado en los proporcionados por la NASA, dentro del programa ARSET (Applied Remote Sensing Training). En específico, uno de los correspondientes al programa de entrenamiento denominado: High Resolution NO₂ Monitoring From Space with TROPOMI [33] [34] [35], aplicado en el caso de este trabajo al CO. El código corresponde al Código 2 y se presenta en el Anexo.

Cabe mencionar que todos estos programas han sido ejecutados desde el entorno SPYDER, que posee un entorno de desarrollo integrado (IDE) diseñado específicamente para la programación en Python, siendo parte de la distribución Anaconda, que es un software que incluye varios paquetes y herramientas útiles para el análisis de datos y la ciencia de datos en Python. También se ha empleado en ocasiones Python desde el propio ArcGIS utilizando su biblioteca "arcpy", de lo cual se hablará más adelante.

2.2.5. Nomenclatura y estructura de los ficheros

Una vez se tienen los archivos descargados, se puede observar que poseen un nombre largo con una extensión .NC, como el mostrado en el siguiente ejemplo:

```
S5P\OFFL\L2\CO\20190401T102540\20190401T120711\07591\01\010300\20190407T094656\
```

El formato NC está encriptado. El peso de los ficheros varía entre los 100MB y 200MB aproximadamente. Los diferentes parámetros están separados por sub-guiones. En este caso los primeros tres dígitos (S5P) corresponden al nombre del satélite, que es Sentinel-

5P; OFFL_ es el tipo de procesamiento de los datos, siendo en este caso Offline; L2_ es se refiere al nivel de los datos, correspondiendo aquí al nivel 2 (level 2); CO_ es el identificador del tipo de producto, siendo monóxido de carbono; lo siguiente es la fecha (puesta de la forma año-mes-día) y la hora en la que fue tomada la primera medida, y a continuación separada por un guion, en la que fue tomada la última. En el ejemplo la primera medida del fichero habría sido tomada el 1 de abril de 2019 a las 09:46:56 UTC, mientras que la última, el 1 de abril de 2019 a las 12:07:11 UTC. Después los siguientes números hacen referencia a la órbita, y finalmente, los últimos corresponden a la fecha y hora en que fueron procesados los datos (siguiendo la misma estructura que se ha mencionado antes). [31]

El fichero posee una estructura matricial de 2360 x 215 elementos. También hay otras matrices con las mismas dimensiones que corresponden a la precisión de las columnas y a la calidad y fiabilidad de los datos (qa_value). Un qa_value cercano a 1 sugiere que los datos son de alta calidad y se pueden utilizar con confianza para la realización de análisis y estudios, o que en el momento de las observaciones el cielo estaba bastante despejado con poca nubosidad. Por otro lado, si el valor es cercano a 0 indica que las medidas pueden ser menos precisas, estar defectuosas o que se presentaron problemas durante su adquisición o procesamiento. Lo óptimo es que tengan un qa_value como mínimo mayor que 0,5, tal y como recomienda la guía de usuario de Sentinel-5P.

Por otro lado, su cobertura espacial corresponde a una franja de 2600 km. Completa diariamente mediciones de radiancia y reflectancia para latitudes $> 7^\circ$ y $< -7^\circ$, teniendo una cobertura superior al 95% para latitudes en el intervalo $[-7^\circ, 7^\circ]$.

En cuanto a su resolución espacial, el tamaño del píxel era de 7.0 x 7.0 km a lo largo del eje X al comienzo de su misión, pero desde el 6 de agosto de 2019 pasó a ser de 7.0 x 5.5 km. [32]

Mediante el mencionado Códigos 2 se transforman los datos que están en formato*.NC a formato *.CSV. Posteriormente, se realiza un cambio de formato de un par de columnas de los *.CSV con el Código 3, lo cual posibilita su tratamiento dentro de un SIG, donde se procederá al procesamiento espacial de la información.

2.2.6. Procesamiento de los datos en entorno SIG

Un SIG o GIS, en inglés (Geographical Information System) es una herramienta que integra datos geográficos y atributos asociados para analizar, visualizar y gestionar información espacial. Estos sistemas permiten capturar, almacenar, manipular y presentar datos geográficos en forma de mapas digitales, facilitando la toma de decisiones en una amplia gama de aplicaciones, desde planificación urbana y gestión de recursos naturales hasta epidemiología y logística. Un SIG combina capas de información geográfica, como mapas, imágenes satelitales, datos topográficos y atributos alfanuméricos, permitiendo la realización de análisis espaciales complejos y

modelización de escenarios. En este trabajo se empleará ArcGIS como Sistema de Información Geográfica. Específicamente, ArcGIS es uno de los sistemas de información geográfica más conocidos y utilizados en el mundo. Desarrollado por la empresa Esri, ArcGIS ofrece una suite de software que incluye herramientas de captura, edición, análisis y visualización de datos geoespaciales. Con una interfaz intuitiva, los usuarios pueden crear mapas interactivos, realizar análisis avanzados como modelado de redes, análisis de proximidad y superposición de capas, y generar informes basados en ubicación. ArcGIS se utiliza en diversos campos, desde la gestión de recursos naturales, el monitoreo del cambio climático hasta la planificación de infraestructuras y la respuesta a desastres, proporcionando una plataforma versátil para aprovechar el poder de los datos espaciales en la toma de decisiones informadas. El procesamiento de los datos se ha desarrollado usando las versiones ArcGisPro 2.8.0 y ArcMap 10.8.0, de manera combinada.

Antes de su tratamiento en el SIG, utilizando el Código 4, los nombres de los ficheros originales fueron acortados. Este paso aporta comodidad y rapidez al proceso de tratamiento, además de una mayor claridad en el almacenamiento de la información. Una vez se tienen los ficheros en el formato requerido (*.CSV), se arrastran directamente a ArcGIS Pro. Los archivos son importados virtualmente. A continuación, se comprueba que poseen los mismos campos de información que el archivo original y el formato correcto.

Posteriormente, cada uno de los ficheros virtuales se transforman en ficheros de formato vectorial, con topología de puntos georeferenciados, usando la información de latitud y longitud asociada a cada dato registrado por TROPOMI (Figura 9). Esta transformación se realiza empleando el Código 5 desde el propio ArcGIS Pro.

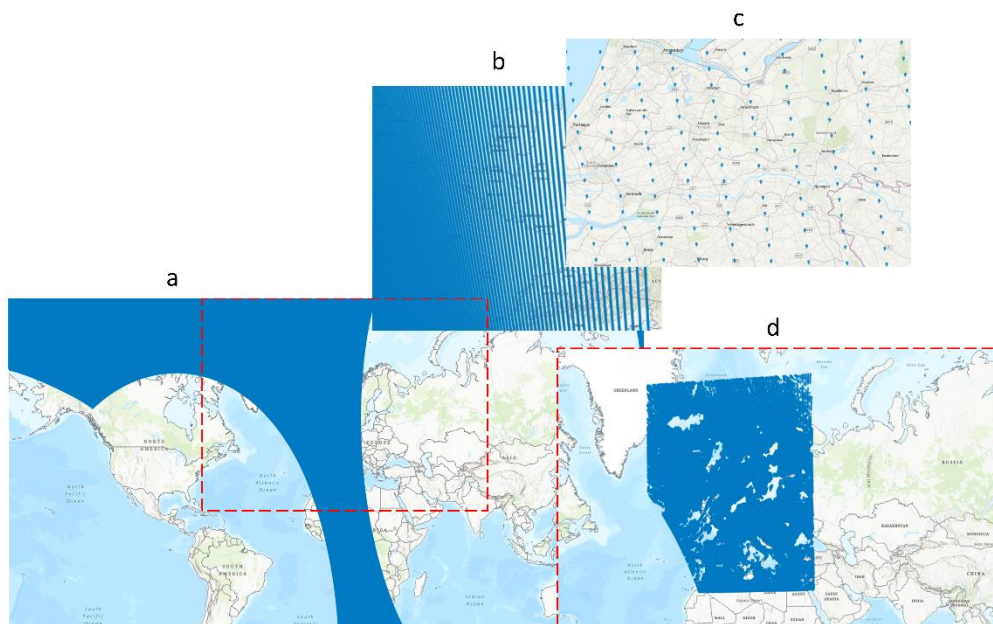


Figura 9. Distribución espacial de los registros tomados por TROPOMI el 1 de abril de 2019, presentados en coordenadas proyectadas en un sistema de referencia WGS84. Los datos se presentan en tres escalas: a, datos originales; b, detalle a escala 1/500.000; c, detalle a escala 1/250.000; d, detalle del área adyacente recuadrada en rojo, mostrando la distribución espacial ocupada por el mapa de puntos tras ser recortado por las dimensiones del área de estudio.

El siguiente paso consiste en descartar aquellos puntos que poseen un valor de qa_value poco fiable, que pudieran dar lugar a medidas erróneas. Empleando las herramientas de análisis de la base de datos asociada a los puntos, mediante el Código 6 se eliminaron aquellos puntos con un qa_value=0.

Posteriormente, se ha procedido al recorte de la información por la zona de estudio descrita anteriormente (Figura 9 d). Dicho recorte aporta una reducción del tamaño de los ficheros lo que facilita la gestión de los datos. Para realizar este recorte se emplea el Código 8. Finalmente, el mapa de puntos es un fichero vectorial que conserva la geodatabase asociada y está guardado en formato shapefile (*.SHP, formato propio de ArcGIS).

2.2.7. Transformación de las lecturas puntuales de CO en un modelo de distribución espacial de concentraciones.

Los puntos que componen el fichero resultante presentan lecturas de CO registradas en mol/m². Se necesita transformar dichos valores de concentración a otros más acordes al tipo de análisis a realizar. Así, las concentraciones iniciales se transforman para expresar los valores de las columnas verticales de los gases a techo de la troposfera (aproximadamente 10 km). Partiendo de los valores extraídos mediante el Código 1, y asumiendo que los gases presentes dentro de la troposfera (hasta 10 km), poseen una concentración homogénea, se puede estimar esta concentración empleando la siguiente expresión Ec.1[16]:

$$C = \frac{C_{COL}}{H} \cdot M \cdot A$$

Ecuación 1.

dónde C COL es la columna total, medida en mol/m², M es la masa molar en g/mol, H es la altura a la que se quiere conocer el valor de la concentración, expresada en metros, en este caso se trabajará con H = 10 km (10⁴ m), que es aproximadamente la región límite de la troposfera. Debe tenerse en cuenta que la constante A = 1000 se emplea para convertir los valores a mg y así obtener la concentración en mg/m³. Para realizar este paso se ha empleado el Código 7 que se presentará a continuación en los resultados.

Tras dicha transformación se lleva a cabo un tratamiento de interpolación para conseguir un modelo distribuido que presente la variación espacial de las concentraciones de CO

a lo largo del territorio europeo, y para el día considerado. Lógicamente, este tratamiento implica un análisis geoestadístico de la información.

Existen muchos procedimientos de interpolación que se pueden aplicar para llevar a cabo esta distribución espacial [35]. En este TFG, dado que su objetivo es demostrar la utilidad del código diseñado, se aplicó un modelo lineal de interpolación en función inversa a la distancia. En concreto, se aplicó un procedimiento de interpolación distribuida por el inverso de la distancia al cuadrado (o *Inverse Distance Weighted*, IDW, por sus siglas en inglés) empleándose para ello el Código 9. Las razones para aplicar este método son las siguientes: se trata de un procedimiento sencillo de aplicar; se emplean nubes de puntos de información muy masivas y homogéneamente distribuidas por el territorio a analizar. [35] [36].

En síntesis, el procedimiento de interpolación considerado es de tipo lineal y depende de los datos registrados puntualmente, $P(x_i, y_i)$ se expresa de la siguiente manera Ec .2:

$$P(x, y) = \sum_i \omega_i(x, y) \cdot P(x_i, y_i)$$

Ecuación 2.

siendo $P(x, y)$ las concentraciones en la celda de coordenadas (x, y) y $\omega_i(x, y)$ el factor de ponderación en las coordenadas (x, y) relativo al valor registrado en el punto de coordenadas (x_i, y_i) .

Empleando este método agregado se puede obtener una concentración media para toda la cuenca. Esta concentración es el promedio de las concentraciones de las columnas, al techo de la atmósfera, en la superficie total A . Es decir, ponderado por el área A , si se asume un dominio discreto de mallado regular:

$$\bar{P} = \frac{1}{A} \int P(x, y) \cdot dx dy \quad o \quad \bar{P} = \frac{1}{A} \sum P(x, y) \cdot \Delta x \cdot \Delta y$$

Ecuación 3.

donde x e y son las resoluciones oeste-este y norte sur del mallado regular empleado (es decir, el tamaño de pixel). En un modelo agregado como el descrito, la concentración media se obtiene directamente de los valores registrados puntualmente:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \frac{1}{A} \int \sum_i \omega_i(x, y) \cdot P(x_i, y_i) \cdot dx dy = \frac{1}{A} \cdot \sum_i P(x_i, y_i) \cdot \int \omega_i(x, y) \cdot dx dy = \\ \sum_i \bar{\omega}_i \cdot P(x_i, y_i) &\Rightarrow \bar{\omega}_i = \frac{1}{A} \int \omega_i(x, y) \cdot dx dy \end{aligned}$$

Ecuación 4.

donde, tal como se señaló anteriormente, los w_i son los pesos para el cálculo de la concentración en esa cuenca y $P(x_i, y_i)$ la concentración registrada en cada punto i . Los pesos $w_i(x, y)$ y w_i sintetizan la información sobre el tratamiento de la concentración y sus valores dependen del método de interpolación elegido.

El método distribuido debe considerar la continuidad de la variable concentración de CO en el territorio. Evidentemente, el aumento de distancia entre dos puntos supone una menor similitud entre los datos, lo que justifica el uso de factores de ponderación dependientes de una función inversa de la distancia, siendo d la distancia entre el dato y el punto de estimación y c una constante a parametrizar. El método IDW se presenta mediante la siguiente expresión:

$$P(x, y) = \frac{\sum_i^N \frac{P_i}{d_i^b(x, y)}}{\sum_i^N \frac{1}{d_i^b(x, y)}}$$

Ecuación 5.

donde N y b son los parámetros que definen la forma de la función interpolada y que dependerían de la distribución de los datos. N corresponde con el número de puntos más cercanos utilizados para obtener la concentración en una celda. La ponderación b de cada dato se hace función de la distancia a la celda, que en este caso es al cuadrado. Sin embargo, este procedimiento basado únicamente en un criterio de distancias no filtra las redundancias de información derivadas de las aglomeraciones de datos en redes irregularmente espaciadas

3. Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en el presente TFG y, una discusión de los mismos. Un primer conjunto de resultados corresponde con los códigos desarrollados para el tratamiento de los datos. A continuación, un segundo conjunto de resultados corresponde a las medidas de CO tomadas con dichos códigos. Recordemos que los resultados de este segundo conjunto están orientados a evaluar la influencia de las actividades humanas en la producción de CO. Para ello, primero se presentarán los datos correspondientes al mes de abril de 2019, 2020 y por último de 2021 dentro del área de estudio; y posteriormente se llevarán a cabo las comparaciones pertinentes.

3.1 Códigos diseñados para el tratamiento del problema

Uno de los resultados más relevantes del presente trabajo es el diseño de códigos de programación para el tratamiento de las medidas de CO capturadas por el sensor TROPOMI. Se han diseñado 9 códigos (ver Anexo A) para el tratamiento de la medida de CO y su manejo espacial dentro del SIG. Dichos códigos, que se presentan a continuación, posibilitan desde la descarga de los datos procedentes del sensor TROPOMI hasta la organización de procesos de tratamiento geoespacial. La presentación de dichos códigos se realizará siguiendo una misma línea argumental empleada en la metodología, con el fin de orientar al lector de en qué momento y con qué fin se está utilizando cada uno, dado que los códigos son complementarios entre sí dentro del tratamiento presentado anteriormente en la metodología.

3.1.1. Código 1. Descarga de datos del sensor

Como se ha comentado en la metodología, el primer resultado de este trabajo ha sido el desarrollo de un código en lenguaje Python para la descarga de los datos desde el sensor TROPOMI (Anexo A, Código 1). Este código consta de 38 líneas y posibilita el que se pueda descargar un conjunto numeroso de datos de un área geográfica en concreto desde la API de Copernicus en lugar de tener que seleccionarlos uno por uno.

Para poder utilizarlo se ha de ejecutar por ejemplo desde Spyder y se han de ajustar diferentes parámetros. Por un lado, se han de introducir las coordenadas (corresponden a la variable “coordinates”) que forman los vértices del cuadrado que engloba la zona de interés (líneas 9-20). A continuación, es establecer el rango de fechas de búsqueda a los que corresponden los datos, siendo “start_date” la variable que hace referencia a la fecha de inicio (año, mes, día) y “end_date” la de fin, con el mismo formato, pudiendo hacerse una especificación más respecto al porcentaje de nubosidad para tratar de acotar más los datos (líneas 22-25). Posteriormente, se debe concretar el satélite con el que se quiere trabajar, el producto (gas/emisión) que se quiere obtener y el nivel de procesamiento. Tras haber escrito los parámetros que se quieren, se ejecuta el código y así comenzará la descarga de los archivos en el terminal.

En el caso concreto de este presente trabajo, como ya se ha comentado todos los datos corresponden a los meses de abril de 2019, 2020 y 2021 para las coordenadas geográficas europeas presentadas en el área de estudio.

Los datos crudos de 2019 constan de 47 ficheros del 1 al 29 de abril con un tamaño de entre 100 y 200MB cada uno de los mismos, lo que supone un total de 6,12GB para 2019.

Por otro lado, los datos de 2020 constan de 46 ficheros también entre el 1 y el 29 de abril de 2020, con un tamaño de entre 150 y 200MB cada uno de los mismos, lo que supone un total de 7,52GB para 2020.

Finalmente, los datos de 2021 constan de 50 ficheros de entre el 1 y el 29 de abril, con un tamaño de XMB cada uno de los mismos, lo que supone un total de 8,32GB para 2021.

3.1.2. Códigos 2, 3 y 4. Tratamiento archivos

Una vez que se completa la descarga, se tienen datos crudos en formato*.NC, por lo que han de procesarse para poder trabajar con ellos. Se han desarrollado para ello dos códigos adicionales, además de emplear el desarrollado por la NASA adaptándolo para este caso concreto.

El primer tratamiento realizado es una modificación del código desarrollado por el programa ARSET de la NASA (Código 2). Se ha modificado el tipo de producto (líneas 25 y 42) adaptándolo así al caso concreto del monóxido de carbono. Para poder utilizarlo, primero se ha de crear una lista en formato *.txt dentro de una carpeta, citando los nombres de todos los archivos que se quieren procesar, los cuales han de estar dentro de esa misma carpeta (se ha llamado FileList.txt a esa lista) y al ejecutarlo, se irán transformando uno a uno en archivos *.CSV.

La estructura de estos archivos *.CSV continen las siguientes columnas:

"Year, Month, Day, Hour, Minute, Second, qa_value, latitude, longitude, carbonmonoxide_total_column y carbonmonoxide_total_column_precision. Es decir: Año, Mes, Día, Hora, Minuto, Segundo, qa_value, Latitud, Longitud, Columna total de CO y Precisión de la columna total de CO. Cada fichero tiene aproximadamente 890.000 filas.

Nota: Para facilitar el proceso de introducir todos los nombres de los archivos en el citado FileText.txt, en lugar de ir copiando y pegando cada uno de los nombres, se se ha creado una rutina sencilla que identifica la carpeta a analizar, y mete los nombres de los archivos en esa carpeta, creando un archivo .txt.

Dado que el Código 2 a pesar de transformar los archivos en .CSV puede llegar a dejar alguna columna en formato STRING, lo cual genera problemas de importación en el SIG (ArcGIS), impidiendo el reconocimiento de estos campos (poniendo valores nulos), se ha creado el Código 3 (de 40 líneas aproximadamente) para solventar este problema. Así se comienza introduciendo en la línea 5 la ruta de las carpetas de entrada (es decir, donde están los archivos .CSV que se quieren transformar). Posteriormente, en la línea 8, se introduce la carpeta de salida (donde se guardarán los nuevos archivos *.CSV con el formato correcto), creándose una nueva carpeta en caso de que no existiera. Posteriormente, en la línea 15, se ha introducido un bucle "for" con el que se procede a leer uno por uno los archivos de la carpeta de entrada, y en las siguientes líneas, dentro de cada archivo, se leen una a una las columnas. Finalmente, entre las líneas 24 y 32 se realiza la conversión de las columnas que pueden aportar errores de importación a otros formatos que evitan dichos errores aludidos (más concretamente las columnas 8 y 9, que corresponden a carbonmonoxide_total_column y

carbonmonoxide_total_column_precision) y se les pone un formato numérico, el cual puede ser reconocido correctamente por el ArcGIS Pro.

Finalmente se ha desarrollado por conveniencia el Código 4, el cual cuenta con 12 líneas. Su función es acortar los nombres de todos los archivos quitando el string "S5P_OFFL_L2_CO____", puesto que así se pueden visualizar mejor en ArcGIS ya que se ve directamente la fecha del archivo en nombre. Esto permite tener más espacio en la pantalla para trabajar y reduce los riesgos de equivocarse. Para emplearlo primero se ha de introducir la ruta de la carpeta con los archivos cuyo nombre se quiere modificar (línea 3) especificándose en la línea 5 la parte del nombre del archivo que se quiere quitar. Finalmente se irán recorriendo uno a uno los ficheros de la carpeta cambiando su nombre (líneas 7-12).

3.1.3. Códigos 5, 6 y 7. Primera fase procesamiento en ArcGIS Pro

Teniendo los datos ya listos, se puede proceder a abrir un nuevo proyecto de ArcGIS para comenzar a trabajar con ellos. Primero se seleccionan y arrastran los archivos *.CSV directamente al panel de trabajo de ArcGIS Pro transformándose así automáticamente en tablas. Justamente para poder transformar estas tablas en puntos o "chinchetas" se ha creado el Código 5, que cuenta con 41 líneas.

Este código es también un "script" de Python, pero se ejecuta directamente desde la terminal (Notebook) de ArcGIS Pro utilizando la librería arcpy (línea 1), lo cual proporciona acceso a herramientas del propio programa lo cual permite automatizar ciertas tareas. Se comienza definiendo en la línea 3 una función llamada `tablas_a_puntos_masivo`, la cual toma la ruta al archivo CSV de entrada ("`input_csv`", línea 8) y la de salida ("`output_gbd`", línea 11, línea 25) en la cual se guardan los resultados de las capas convertidas. Se procede entonces a crear el nombre de la capa de puntos de salida en la geodatabase, añadiendo al nombre del archivo el string "`_XYTableToPoint`" para distinguirlo. Entre las líneas 14 y 20 se llama a la herramienta de arcpy "`XYTableToPoint`" para convertir el fichero CSV en una capa de puntos, y asignan a los campos X, Y y Z ("`x_field`", "`y_field`" y "`z_field`") los valores de las columnas de longitud, latitud y monóxido de carbono total correspondientemente, además de concretar el sistema de coordenadas. Se recorre así con el bucle "for" (líneas 32-35) los archivos de la capa que se quiere transformar, y finalmente se va iterando a través de la lista de archivos *.CSV ejecutando la susodicha función "`tablas_a_puntos_masivo`", lo cual convierte cada archivo en una capa de puntos en la geodatabase poniendo un mensaje informativo al finalizar (líneas 38 a 41).

Una forma de comprobar que el proceso ha sido exitoso, es comprobar su aparición en la tabla de contenidos del ArcGIS Pro. Se ven los archivos de puntos. Además, se puede observar que si se activa uno de los archivos, todos los puntos que lo forman quedan

representados, mostrando la trayectoria que el satélite ha realizado durante el periodo en el que fueron tomados los datos, tal y como se ha comentado en la metodología.

Para tratar de asegurarse de que las medidas sean lo más correctas posible, el siguiente paso es descartar todas aquellas cuyo `qa_value` tenga un valor poco confiable. Se ha desarrollado en consecuencia el Código 6, que cuenta con 36 líneas. Este “script” se puede ejecutar tanto antes de transformar las tablas en puntos como más adelante. El código comienza también importando el módulo de `arcpy`, y define una función a la que se ha llamado “`remove_zero_qa_values`”(línea 2). Esta toma el argumento “`input_layer`”, que es la capa de puntos a procesar”. Se procede entonces a crear una lista para almacenar los nombres de los archivos procesados y a recorrer la capa “`input_layer`”. En la línea 8 además se selecciona el campo, siendo “`qa_value`” en este caso. Así entre las líneas 9 y 30 se recorren los registros de la capa utilizando el cursor de la línea 8, eliminándolos en caso de que `qa_value` sea igual a cero. Concluye con las líneas de la 31 a la 35 que muestran un mensaje si se han procesado correctamente los archivos.

Una vez que se han eliminado estos valores, se puede observar que la forma de las chinchetas en el mapa cambia dando lugar a huecos que podrían corresponder a nubosidad, lo cual puede alterar las mediciones del TROPOMI en el momento de la recogida de los datos.

Finalmente, se ha desarrollado el Código 7, que tiene 42 líneas. Este realiza la conversión de las unidades de la columna de CO de mol/m^2 a kg/km^2 . Se sigue más o menos una estructura parecida a lo anterior, pero entre las líneas 9 y 17 se realiza la transformación del campo que representa la columna de CO, “`carbonmonoxide_total_column`” y se crea otra columna llamada “`concentración_CO`”. Para ello en la línea 12 definida como “`expression`” se sigue la fórmula explicada en la metodología y se multiplica además por el área a la que corresponde un píxel del IDW en el ArcGIS Pro. Dado que cada cuadradito es de aprox 9,5 km x 12 km, esta área es $116,28 \text{ km}^2$. Esto es así debido a que cuando se realiza el proceso de transformación de los puntos en IDW, cada casilla puede englobar varios puntos. Este proceso se realiza en la capa especificada en la línea 27 y sale un mensaje de aviso al finalizar el proceso

3.1.4. Códigos 8 y 9. Fase final de procesamiento en ArcGIS Pro

Teniendo ya los puntos y sus unidades listos, se han elaborado otros dos códigos para poder tratar los datos: el Código 8, que cuenta con 37 líneas y recorta el área deseada de los ficheros, y por otro lado el Código 9 (tiene 46 líneas), que transforma los puntos en IDW.

La estructura es similar en bastantes aspectos a los códigos comentados anteriormente, con la diferencia de que para realizar el recorte, utiliza la herramienta de `arcpy` “`Clip`”. Sin embargo, para utilizar el Código 8, se ha de dibujar previamente sobre la zona de interés un polígono en formato *.SHP (al que se ha llamado “`Rectángulo.shp`” en este

caso). Se puede observar que se define en la línea 20. También se ha de especificar el nombre de la capa de puntos en la que se quiere trabajar (línea 29). Esto crea otra capa de puntos únicamente con las chinchetas que se encuentran dentro de dicho área.

Hay que tener en cuenta que las medidas de algunos días no pasan por todo el territorio de interés, por lo que se ha de realizar también una valoración visual de los datos que se tienen y de las áreas con las que se quiere trabajar pudiéndose llegar a descartar algunos días que no cuenten con los datos suficientes o que tengan demasiados “huecos”. Razón por la que trabajar con el SIG es mas eficiente que con las rutinas de programadas en ARSET. Además, dado que en ocasiones puede haber dos archivos para un mismo día, en caso de que se quiera realizar un análisis diario es conveniente realizar la operación MERGE para unir esas chinchetas en un único archivo y contar así con una para cada día.

Finalmente, se ha desarrollado el Código 9, el cual consta de 46 líneas. Su función es aplicar en cada archivo de puntos el procedimiento de interpolación distribuida por el inverso de la distancia al cuadrado (*Inverse Distance Weighted*, IDW, por sus siglas en inglés). Para ello, los datos se han ajustado por intervalos los valores de CO, favoreciendo a nivel visual la interpretación y comparación de resultados entre sí.

Entonces se puede proceder a la realización de la media de CO de las medidas de todo el mes. Para ello, se pueden emplear las herramientas de ArcGIS Pro de “Cell Statistics” y ahí seleccionar “Mean” (media), pertenecientes a las Raster Functions, seleccionando los archivos IDW que se quieren tener en cuenta. Mediante dichos datos de entrada, se obtiene un mapa que representa la media de monóxido de carbono del año correspondiente, para el mes analizado. A partir de él, se puede elaborar un histograma y obtener otros datos de interés como estadísticas zonales, tal y como se verá más adelante.

3.2. Resultados del análisis de CO

A continuación, se presentan los datos de CO obtenidos para cada uno de los años y para el territorio europeo centrando la discusión en los 5 países seleccionados por la buena representatividad de los datos (Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido).

3.2.1. Abril 2019

La Figura 11 muestra la distribución de CO tomada para el día 1 de abril de 2019 para el área de estudio. El rango de valores oscila principalmente entre 5,68 kg/km².y 22,7 kg/km². Se observa que los máximos están sobre todo en zonas muy industrializadas (véase la zona de Lombardía al Norte de Italia, o el Norte de Alemania). Asi mismo, llama la atención de los máximos de CO localizados en el Mar del Norte y puntos del Mar Mediterráneo. Por otro lado, los mínimos corresponden a zonas naturales en general como son las cadenas montañosas (Pirineos, Alpes, etc.). En la península Ibérica y en España, concretamente, los valores tienden a ser bastante bajos. Lógicamente, España,

en términos espaciales, es un país menos industrializado que los territorios antes indicados de Alemania e Italia.

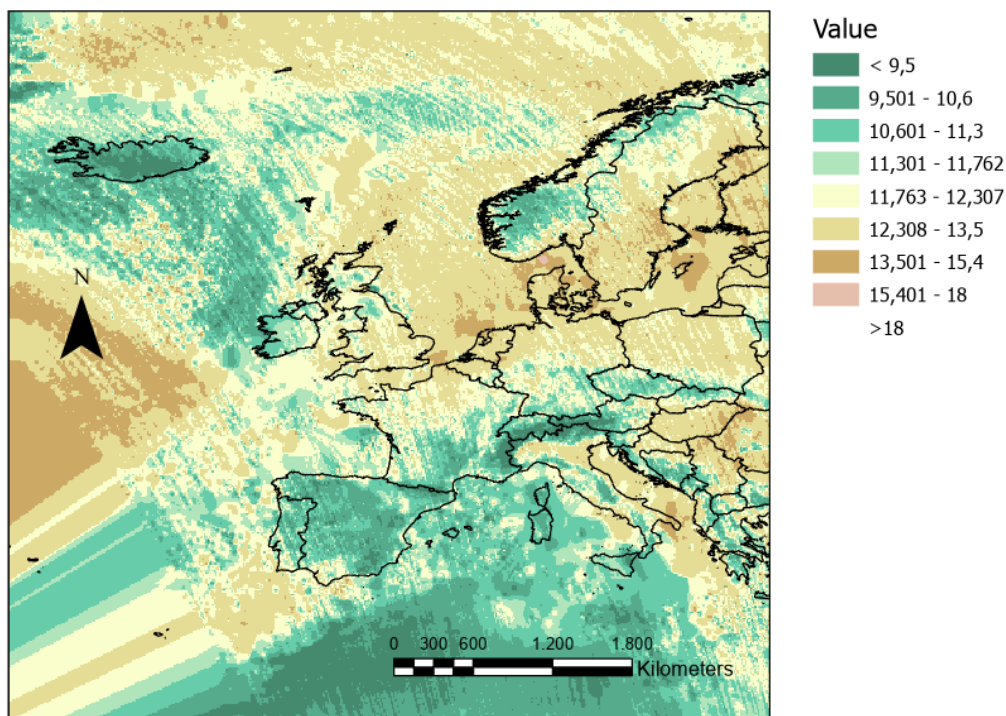


Figura 11. Distribución espacial de las concentraciones de CO tomadas el 1º de abril de 2019 en el ámbito europeo. Los valores de CO se encuentran agrupados en los intervalos que se muestran en la leyenda. Las concentraciones de CO están expresadas en kg/km^2 (el tamaño de pixel es de $116,28\text{km}^2$).

Las lecturas correspondientes a los siguientes días del mes de abril de 2019 se presentan en el Anexo. Un resumen de dichas lecturas se presenta en la Figura 12. Se puede apreciar como en el territorio europeo, a medida que avanza el mes las lecturas de CO se van incrementando hasta el día 16 de abril de 2019. A partir de dicho día, las lecturas de CO son progresivamente menores. Así el día 27 de abril de 2019, los niveles de CO registrados son los más reducidos. en la zona de estudio mientras que el día 16 es el que tiene valores más elevados.

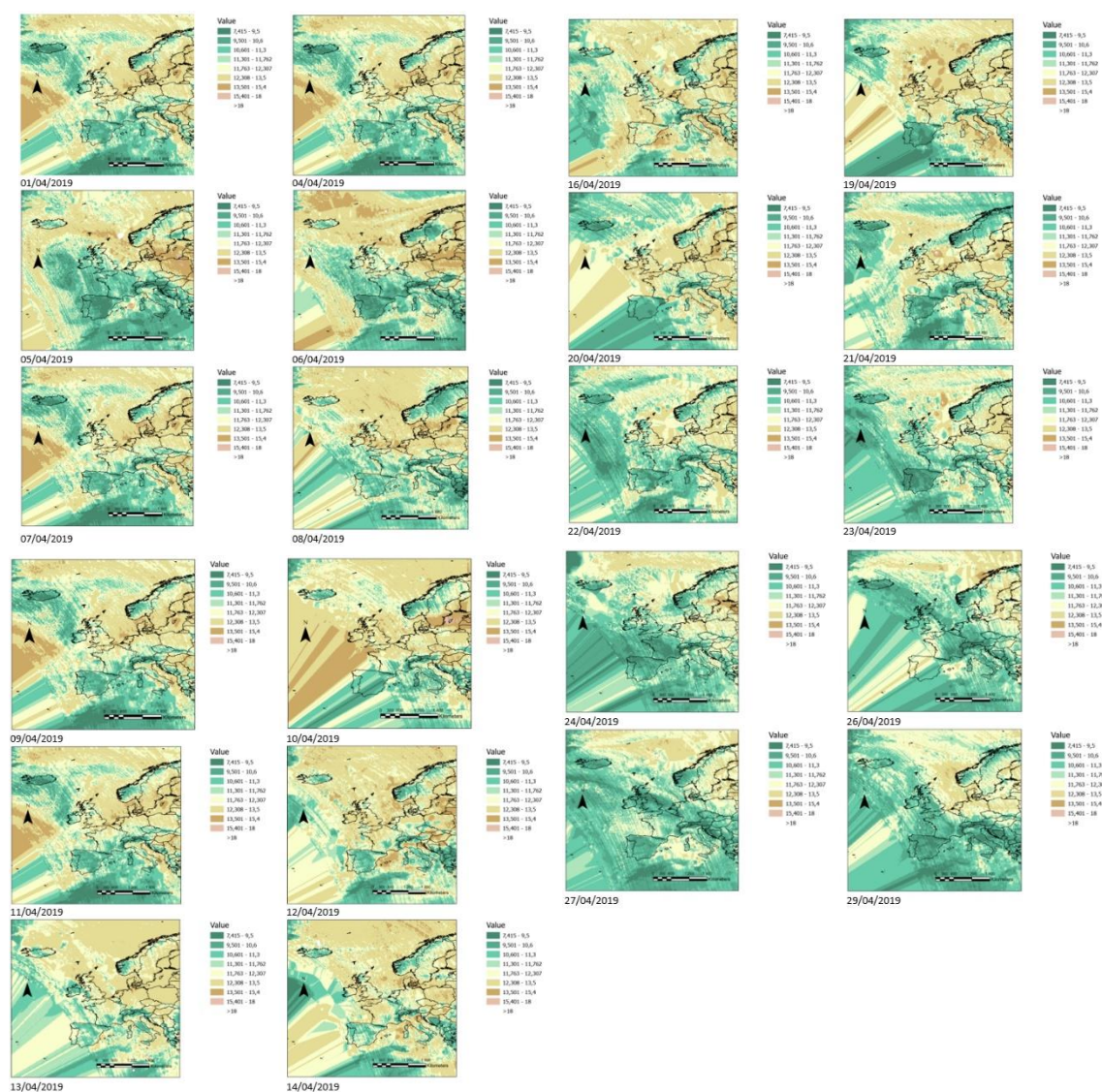


Figura 12. Recopilación de las concentraciones de CO tomadas en abril de 2019 en el ámbito europeo

A partir de todas estas medidas, se ha obtenido el promedio de las concentraciones de CO para el mes de abril de 2019 en todo el territorio europeo habiendo resultado 11,77 kg/km² (Figura 13). La Figura 14 muestra la distribución promedio de los valores de CO para el territorio europeo.

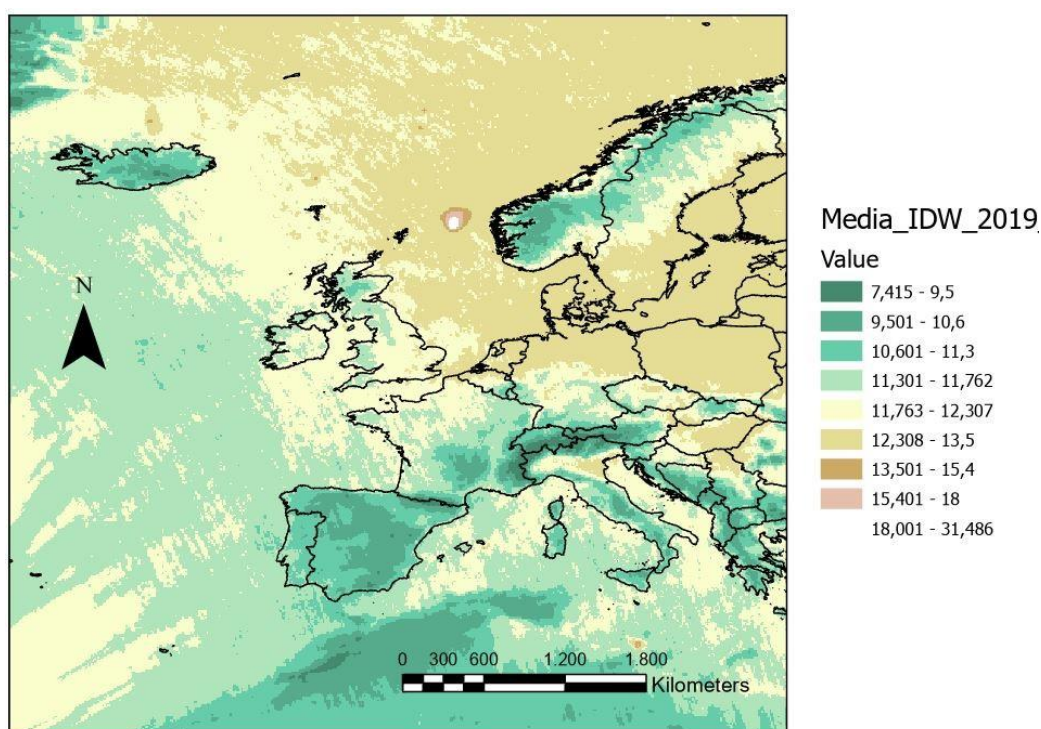


Figura 13. Distribución espacial de las concentraciones promedio de CO tomadas en abril de 2019 en el ámbito europeo. Los valores de CO se encuentran agrupados en los intervalos que se muestran en la leyenda. Las concentraciones de CO están expresadas en kg/km^2 (el tamaño de pixel es de $116,28\text{km}^2$).

Las Figuras 13 y 14 muestran un máximo de CO muy llamativo localizado en el mar del Norte, al oeste de Noruega. Además, se observa como los valores promedio de CO registrados en la zona de la cuenca del río PO (Italia), norte de Alemania y el este de Europa, están por encima de la media europea ($11,77 \text{ kg}/\text{km}^2$). Por otro lado los valores mínimos coinciden en zonas montañosas (los Pirineos, los Alpes, Islandia, además de la Península Ibérica). A partir de estos resultados, se ha realizado un estudio estadístico de las medidas.

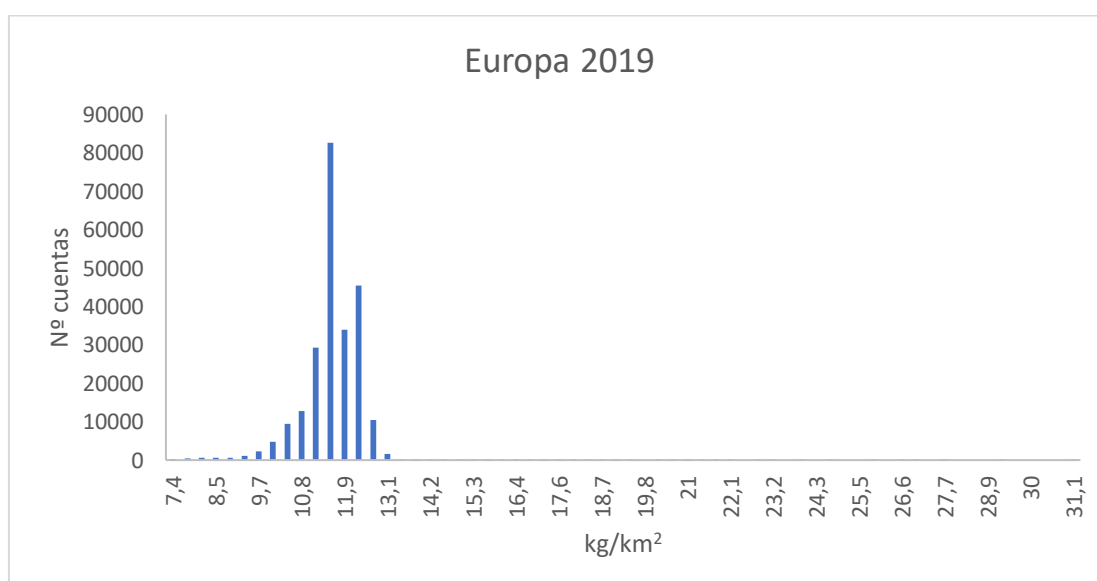
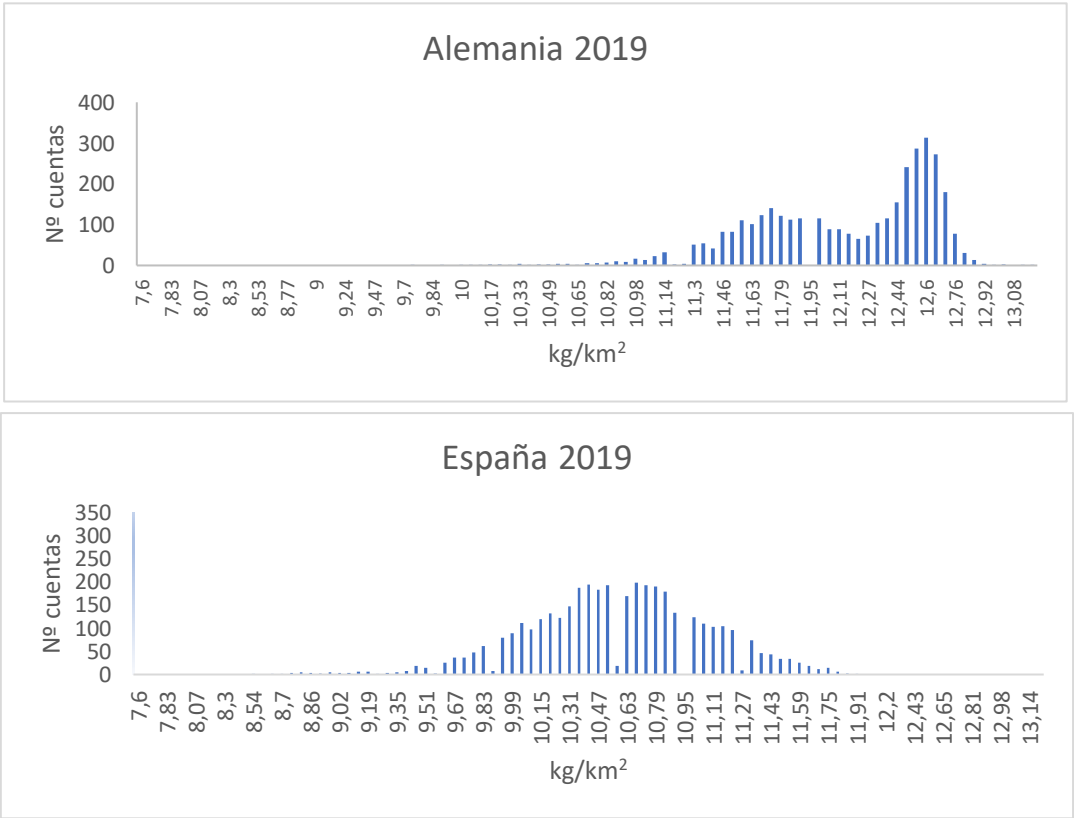


Figura 14. Histograma correspondiente al mes de abril de 2019 del área de interés de Europa. En el eje abcisas están los valores medios de CO expresados en kg/km^2 , mientras que en el eje de ordenadas están representados el número de píxeles del área de estudio.

Los valores promedio para los 5 países antes indicados (Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido) se presentan en la Tabla 2 y en la Figura 15.

Tabla 2. Resultados promedio de las concentraciones de CO para el mes de abril de 2019 perteneciente a los 5 países estudiados (Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido). Las columnas representan el país estudiado, el nº de cuentas o “píxeles” que poseen dicho valor, el valor mínimo de CO registrado, el máximo, el rango en el que fluctúa, la media de todo el país, su desviación estándar y la mediana, todos ellos expresados en kg/km^2 .

País	Cuentas	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación estándar	Mediana
Alemania	3792	9,734897	13,191409	3,456512	12,141927	0,512634	12,254601
España	4366	8,544053	11,964025	3,419972	10,606006	0,49799	10,616296
Francia	5323	7,90842	12,864192	4,955772	11,372507	0,692294	11,613554
Italia	2738	7,599051	12,587798	4,988748	11,164247	0,893955	11,311042
Reino Unido	2772	10,980262	12,610086	1,629825	11,897282	0,2862	11,931046



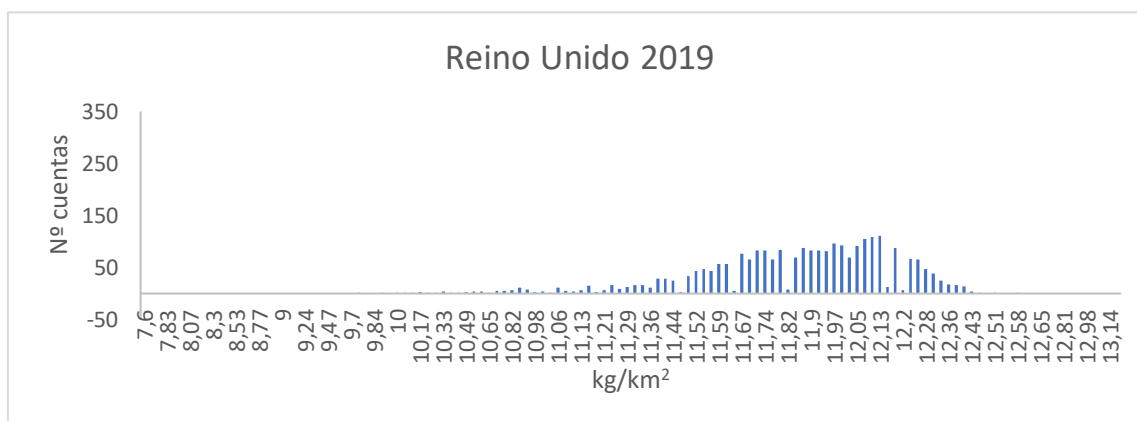
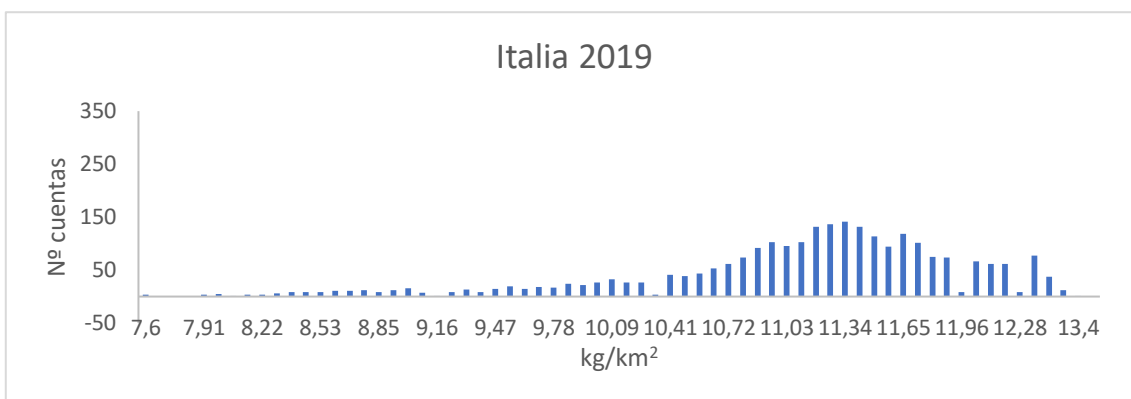
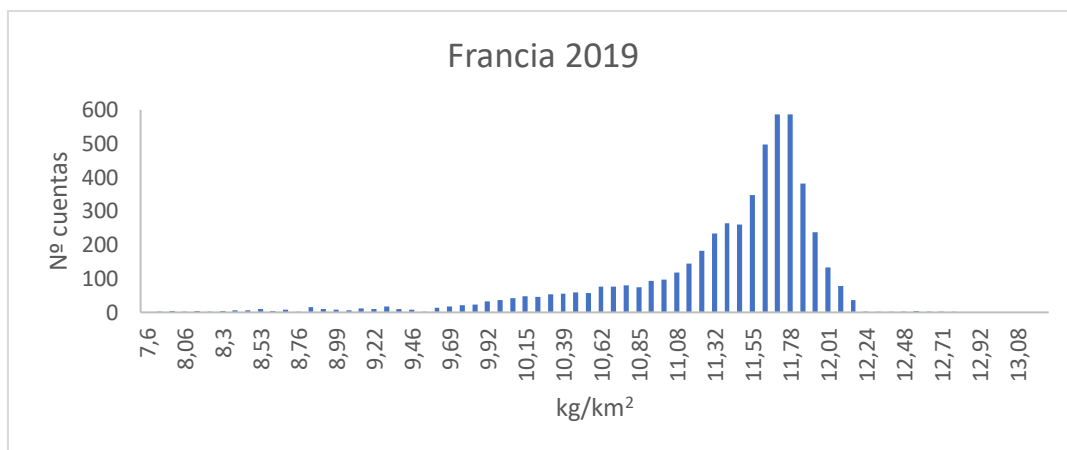


Figura 15. Conjunto de histogramas correspondientes a los valores medios de CO para el mes de abril de 2019 de Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido. En el eje abcisas están los valores medios de CO expresados en kg/km^2 (área de pixel $116,28\text{km}^2$) mientras que en el eje ordenadas está representado el nº de cuentas.

A partir de estos datos se puede observar que los valores medios de CO en países como Alemania y Reino Unido son superiores a la media europea, mientras que en España la diferencia respecto a la misma es bastante notable.

3.2.2. Abril 2020

A continuación, se procede a presentar los datos correspondientes a abril de 2020.

La Figura 16 muestra la distribución de CO tomada para el día 2 de abril de 2020 en la zona de estudio. El rango de valores oscila entre 5,11 kg/km² y 16,2 kg/km².

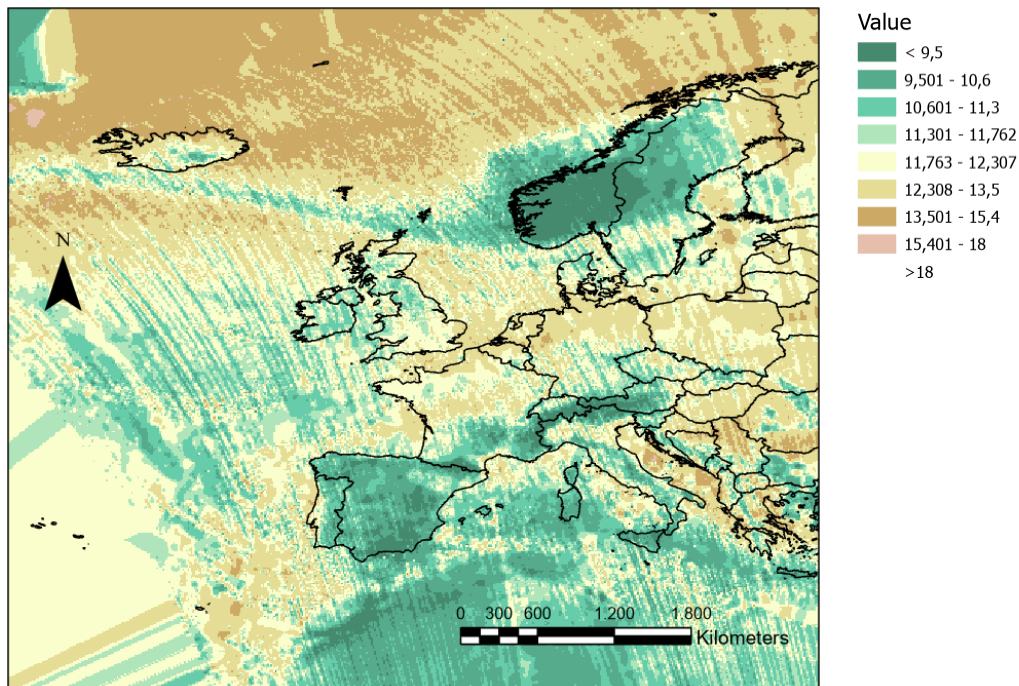


Figura 16. Distribución espacial de las concentraciones de CO tomadas el 2º de abril de 2020 en el ámbito europeo. Los valores de CO se encuentran agrupados en los intervalos que se muestran en la leyenda. Las concentraciones de CO están expresadas en kg/km² (el tamaño de pixel es de 116,28km²).

En la Figura 16, se observan unos mínimos muy pronunciados al suroeste de Noruega (además de en la Península Ibérica y en los Alpes) y se mantiene la tendencia ligeramente más elevada en el Norte de Italia o por ejemplo el Norte de Alemania. Nuevamente, llama la atención los máximos locales situados sobre el Mediterráneo y Mar del Norte. Las lecturas correspondientes a los siguientes días se presentan en el Anexo B. La Figura 17 muestra un resumen de los registros capturados para todo el mes de abril de 2020. En este año, se puede apreciar una reducción de las concentraciones de CO a nivel europeo. Así, los valores de CO van aumentando desde primeros de abril de 2020 hasta el 14 de abril de 2020.

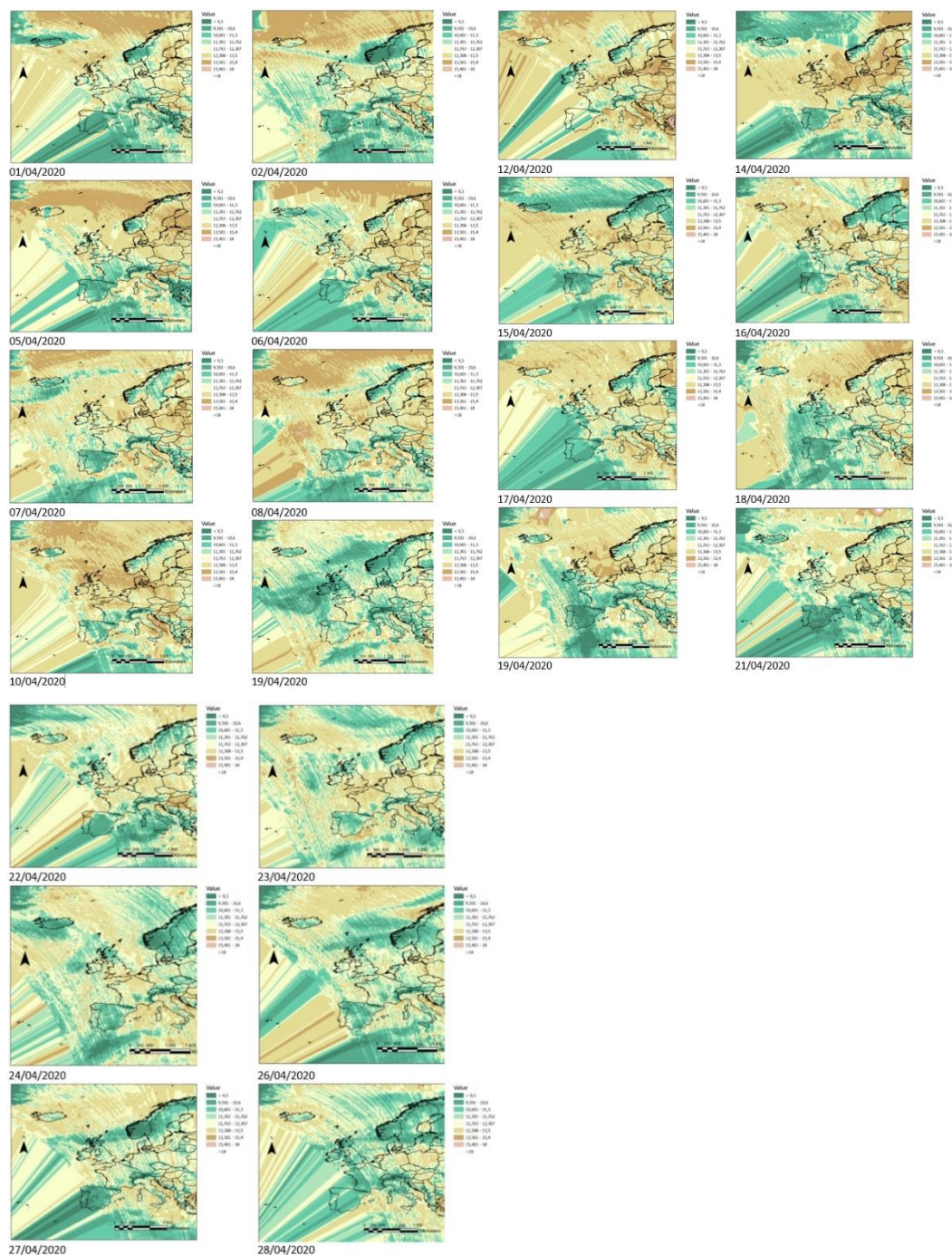


Figura 17. Distribución espacial de las concentraciones promedio de CO tomadas en abril de 2020 en el ámbito europeo. Los valores de CO se encuentran agrupados en los intervalos que se muestran en la leyenda. Las concentraciones de CO están expresadas en kg/km² (el tamaño de pixel es de 116,28km²).

A partir de esta fecha los valores van reduciéndose hasta el día 19 de abril de 2020, que es el que la distribución espacial de CO registra los valores menores, dentro del ámbito europeo.

La Figura 18, muestra la distribución promedio de CO tomada en promedio para el mes de abril de 2020 para el área de estudio. El rango de valores oscila entre 7,67 kg/km² y

22,662 kg/km², con un valor promedio de CO de la zona de estudio para abril de 2020 de 11,99 kg/km². La Figura 19 muestra la distribución de valores de concentraciones para el territorio objeto de análisis.

Nuevamente, en las figuras 18 y 19, se observan los máximos en el mar del Norte además de valores por encima de la media en la cuenca padana (Italia,) Alemania y el este de Europa en general. Por otro lado los valores mínimos se encuentran en zonas montañosas (los Pirineos, los Alpes, Islandia). Debe destacarse que en la Península Ibérica se han registrado concentraciones por debajo de promedio del resto de los países centro europeos.

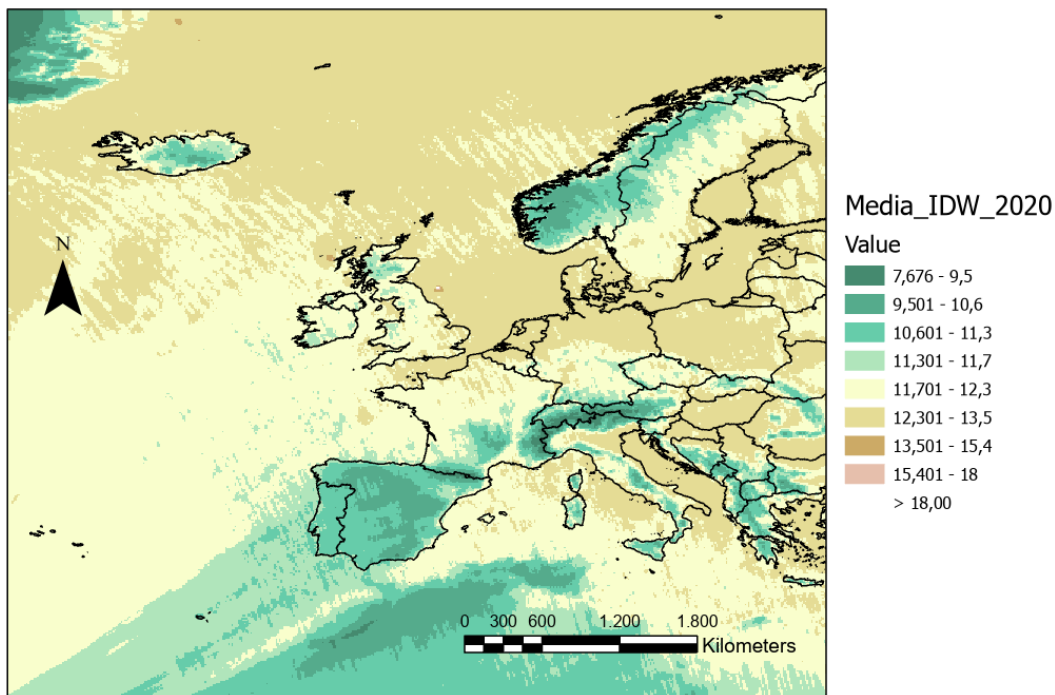


Figura 18. Distribución espacial de las concentraciones promedio de CO tomadas en abril de 2020 en el ámbito europeo. Los valores de CO se encuentran agrupados en los intervalos que se muestran en la leyenda. Las concentraciones de CO están expresadas en kg/km² (el tamaño de pixel es de 116,28km²).

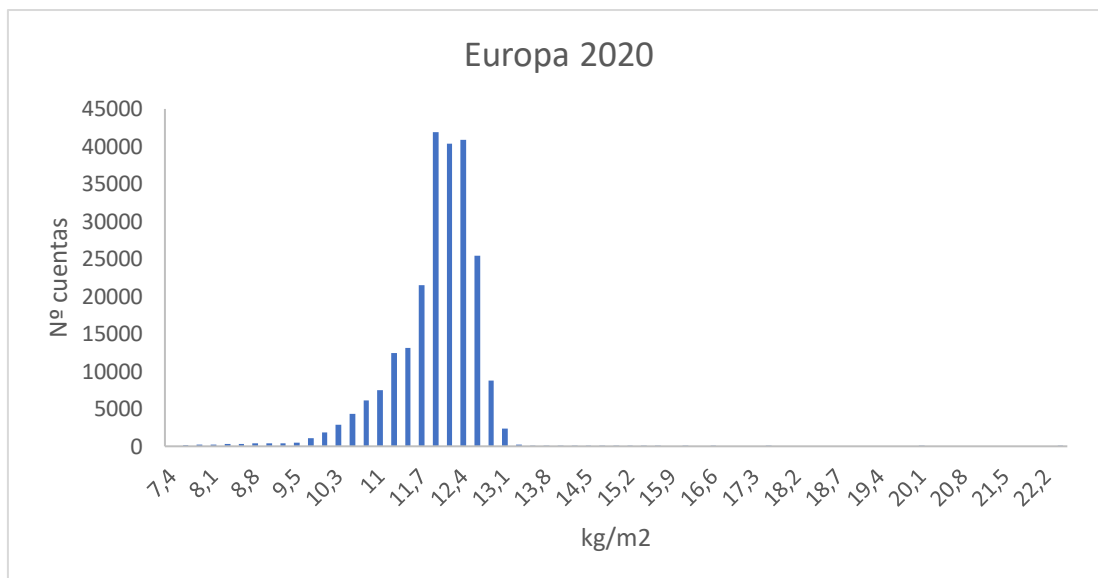


Figura 19: Histograma correspondiente al mes de abril de 2020 del área de interés de Europa. En el eje abcisas están los valores medios de CO expresados en kg/km^2 , mientras que en el eje de ordenadas están representados el número de píxeles del área de estudio, habiéndose obtenido una media de $11,99 \text{ kg}/\text{km}^2$.

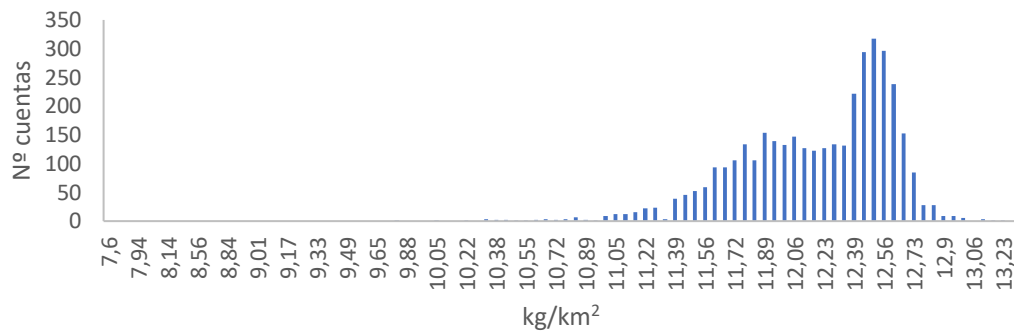
La Figura 19 muestra un desplazamiento hacia valores promedio mas elevados de CO a nivel europeo que respecto al mes de abril de 2019, concentrándose especialmente entre $11,7 \text{ kg}/\text{km}^2$ y $12,6 \text{ kg}/\text{km}^2$ el mayor número de cuentas

En la Tabla 3 se recoge además el análisis de Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido para la comparación de resultados, así como sus respectivos histogramas en la Figura 20.

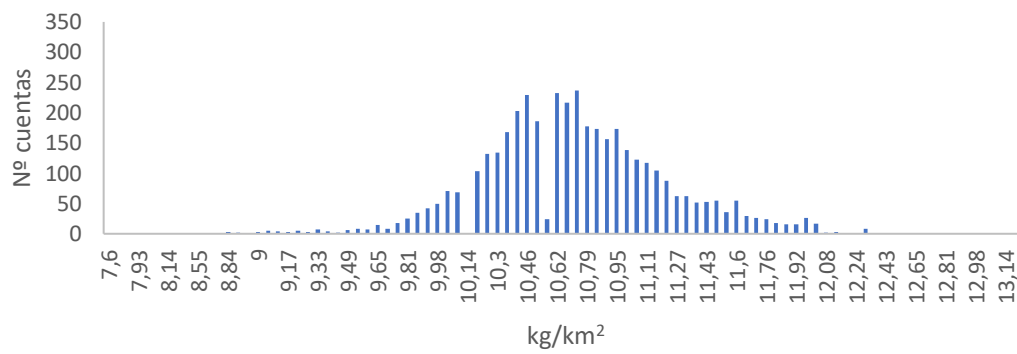
Tabla 3. Resultados promedio de las concentraciones de CO para el mes de abril de 2020 perteneciente a los 5 países estudiados (Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido). Las columnas representan el país estudiado, el nº de cuentas o “píxeles” que poseen dicho valor, el valor mínimo de CO registrado, el máximo, el rango en el que fluctúa, la media de todo el país, su desviación estándar y la mediana, todos ellos expresados en kg/km^2 .

País	Cuentas	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación estándar	Mediana
Alemania	3796	9,715037	13,285951	3,570913	12,2018	0,433818	12,3036
España	4376	8,842296	12,297607	3,455312	10,727478	0,487159	10,696506
Francia	5326	8,221345	12,817541	4,596196	11,696966	0,675947	11,908766
Italia	2756	8,010749	13,00094	4,990191	11,577857	0,93034	11,77691
Reino Unido	2795	11,073712	12,697642	1,62393	12,019653	0,278603	12,068451

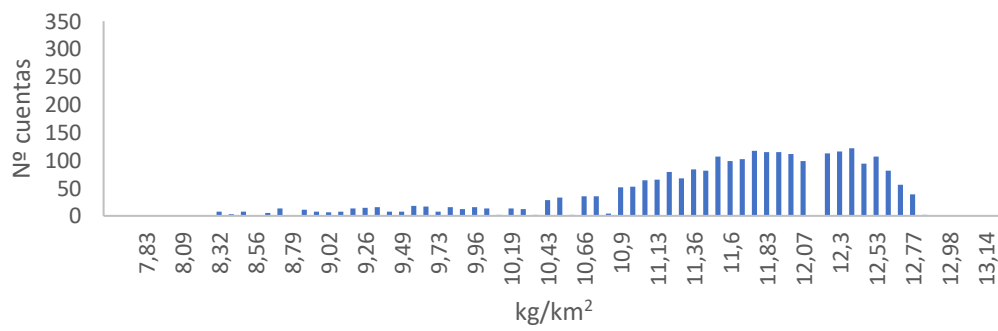
Alemania 2020



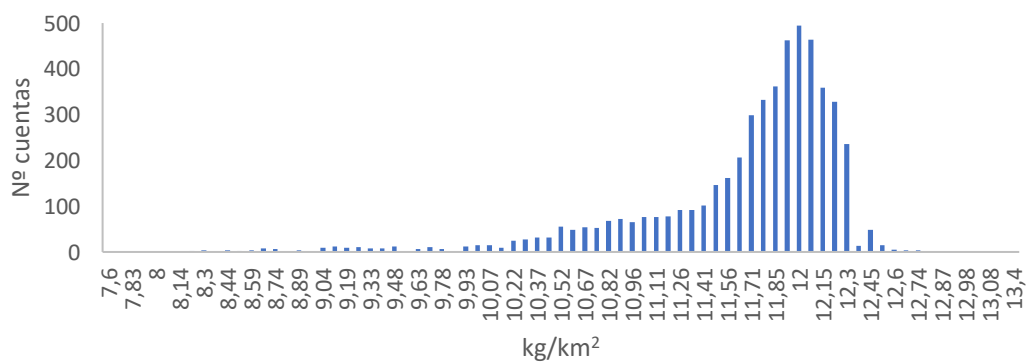
España 2020



Italia 2020



Francia 2020



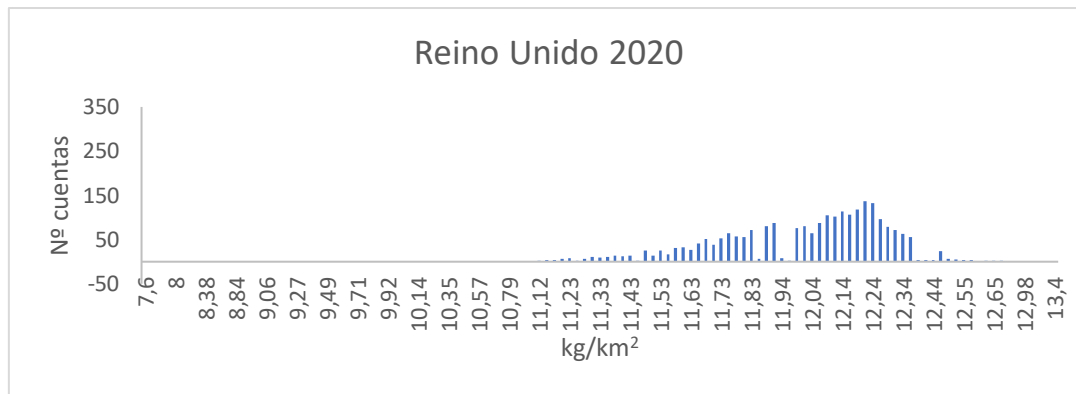


Figura 20. Conjunto de histogramas correspondientes a los valores medios de CO para el mes de abril de 2020 de Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido. En el eje abscisas están los valores medios de CO expresados en kg/km^2 (área de pixel $116,28\text{km}^2$) mientras que en el eje ordenadas está representado el nº de cuentas.

En este caso el valor medio de Alemania e Italia son los más elevados y el de España vuelve a ser el más bajo, pero sorprende en este caso, la media de todos los países es mayor que la media europea. Además, se observa una subida en todos ellos respecto al año 2019.

3.2.3 Abril 2021

Finalmente se presentan los resultados del mes de abril de 2021. La Figura 21 muestra la distribución de CO tomada para el día 1 de abril de 2021 para la zona de estudio y su rango de valores oscila entre $6,3 \text{ kg}/\text{km}^2$ por área de $116,28 \text{ km}^2$ y $20,78 \text{ kg}/\text{km}^2$. Las lecturas correspondientes a los siguientes días se presentan en el Anexo B,

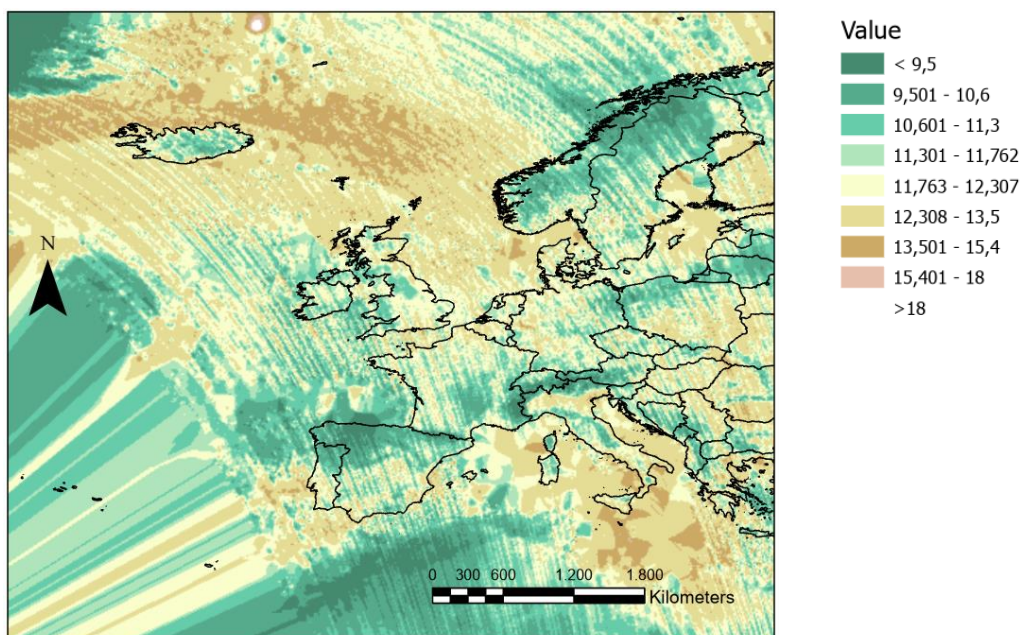


Figura 21. Distribución espacial de las concentraciones de CO tomadas el 1º de abril de 2021 en el ámbito europeo. Los valores de CO se encuentran agrupados en los intervalos que se muestran en la leyenda. Las concentraciones de CO están expresadas en kg/km^2 (el tamaño de pixel es de $116,28\text{km}^2$).

La Figura 22 muestra un resumen de las lecturas tomadas a lo largo del mes de abril de 2021. Los datos muestran como la distribución de las concentraciones de CO presentan valores crecientes alcanzando su máximo el 11 de abril de 2021.

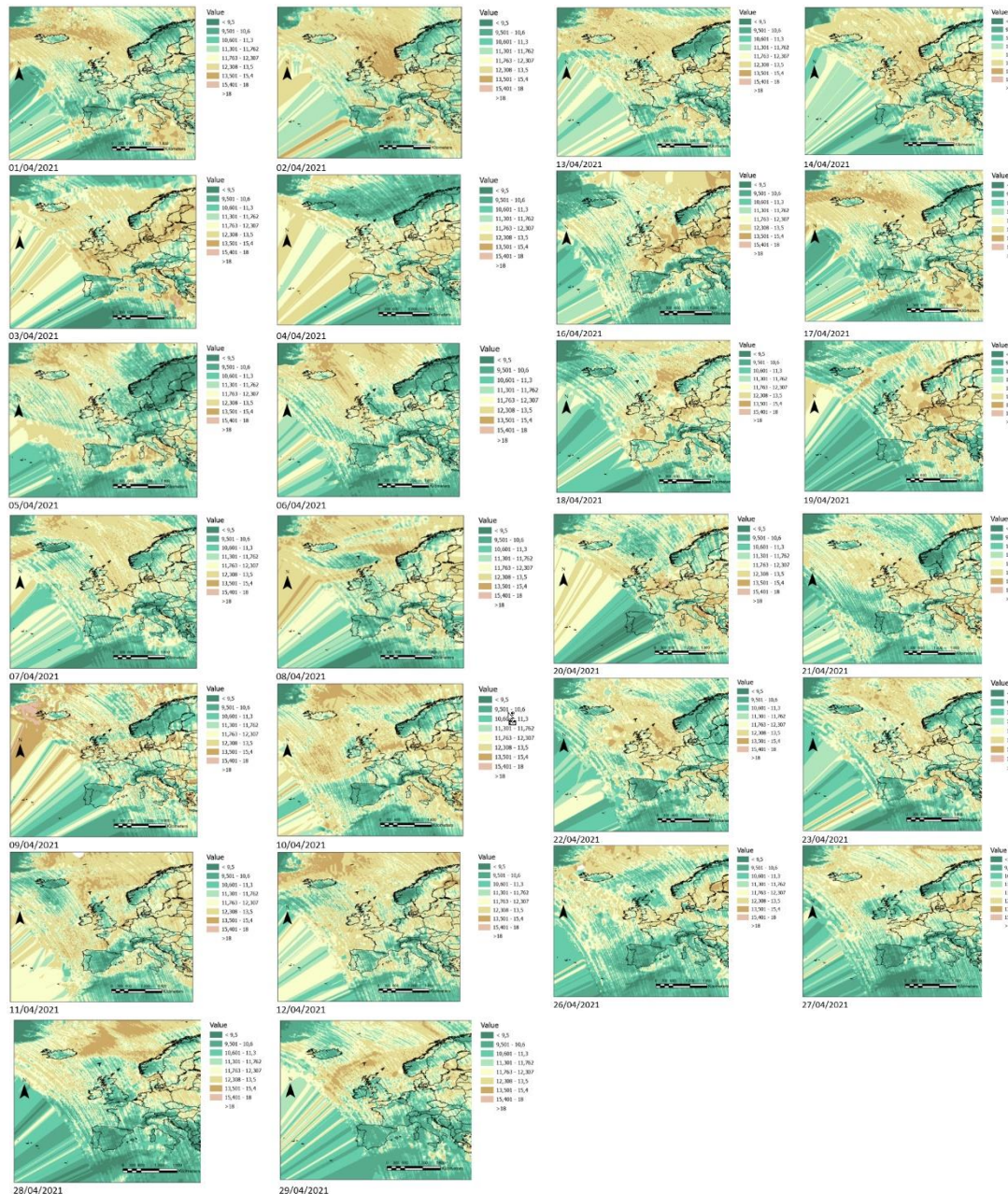


Figura 22. Recopilación de las concentraciones de CO tomadas en abril de 2021 en el ámbito europeo

A continuación, la Figura 23 muestra la distribución de CO tomada en promedio para el mes de abril de 2021 para el área de estudio. El rango de valores oscila entre 7,329 kg/km² y 20,154 kg/km², con un valor promedio de 11,72 kg/km². Se observa que hay un máximo bastante pronunciado en la zona del Ártico, saliéndose casi del área de estudio. Hay que destacar que dichos valores deben de excluirse del estudio al estar situados en los límites del modelo, ya que pueden haberse generado por al emplear valores situados en los límites del área de estudio. Por otro lado, se siguen manteniendo valores mínimos en la Península Ibérica, los Pirineos, los Alpes, el Oeste de Noruega y en la zona de Grecia.

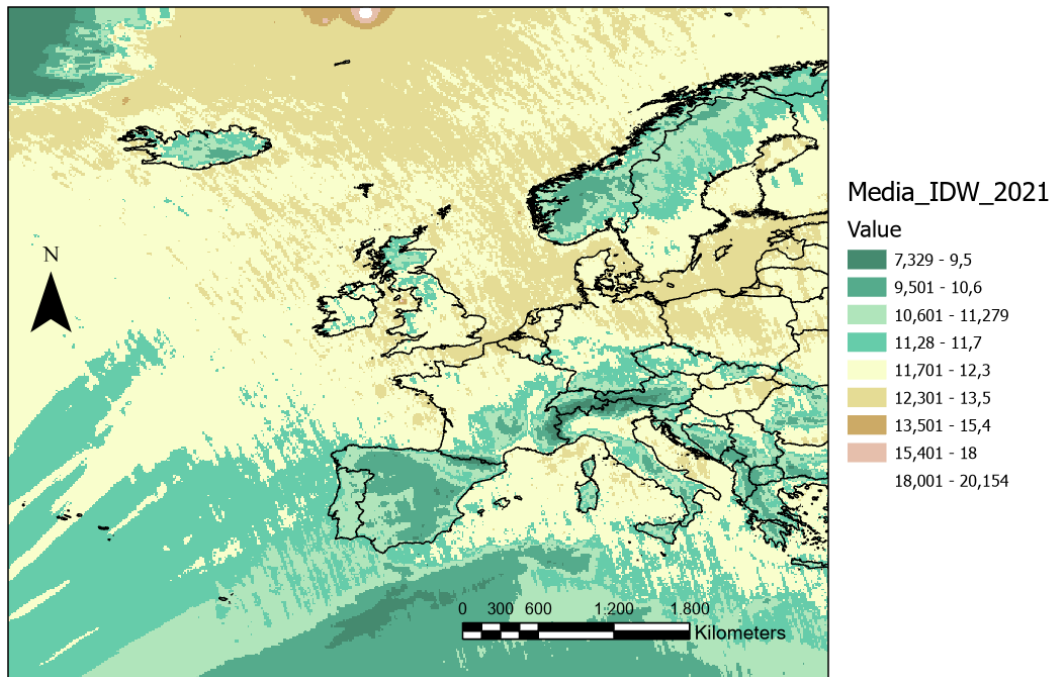


Figura 23. Distribución espacial de las concentraciones promedio de CO tomadas en abril de 2021 en el ámbito europeo. Los valores de CO se encuentran agrupados en los intervalos que se muestran en la leyenda. Las concentraciones de CO están expresadas en kg/km² (el tamaño de pixel es de 116,28km²).

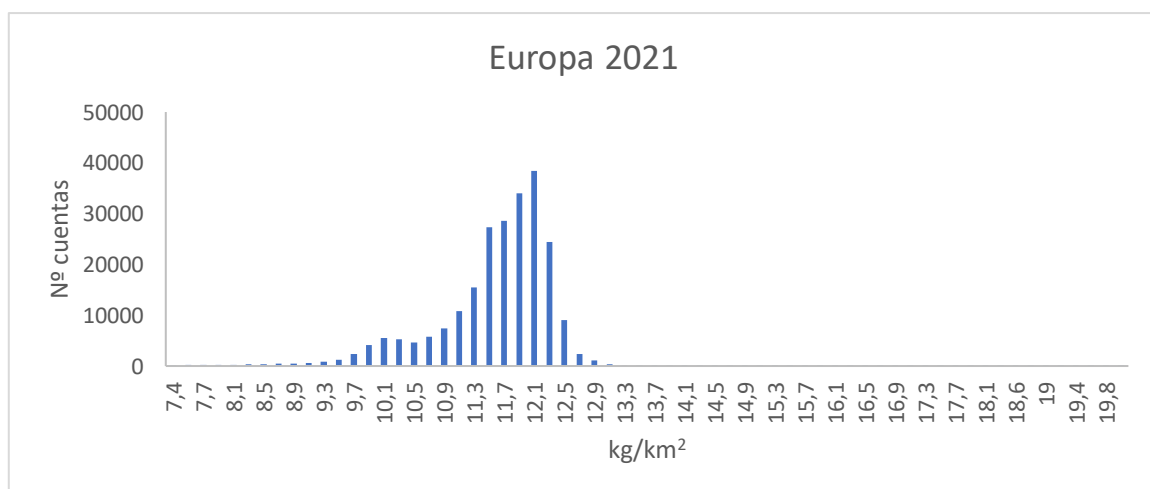


Figura 24: Histograma correspondiente a los valores promedio de CO para el mes de abril de 2021, dentro del área de interés de Europa. En el eje abscisas están los valores medios

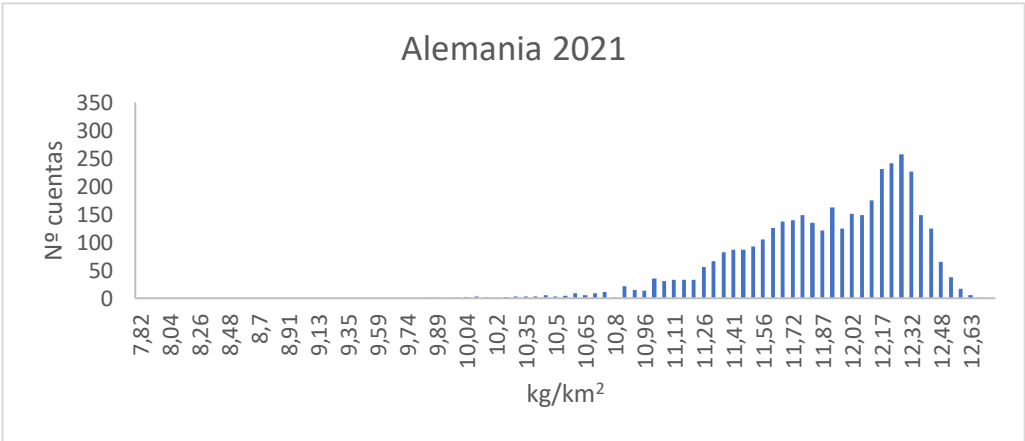
de CO expresados en kg/km^2 , mientras que en el eje de ordenadas están representados el número de píxeles del área de estudio.

La Figura 24 muestra, de manera más clara, la distribución de los valores promedio de CO registrados para Europa, con el valor medio de $11,72 \text{ kg}/\text{km}^2$, indicado anteriormente. A continuación se presentan en el siguiente histograma (Figura 24) el conjunto de dichos datos.

Los datos por países (Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido) se presentan en la Tabla 4, así como en la Figura 25.

Tabla 4. Resultados promedio de las concentraciones de CO para el mes de abril de 2021 perteneciente a los 5 países estudiados (Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido). Las columnas representan el país estudiado, el nº de cuentas o “píxeles” que poseen dicho valor, el valor mínimo de CO registrado, el máximo, el rango en el que fluctúa, la media de todo el país, su desviación estándar y la mediana, todos ellos expresados en kg/km^2 .

País	Cuentas	Mínimo	Máximo	Rango	Media	Desviación estándar	Mediana
Alemania	3792	9,485498	12,730494	3,244995	11,912211	0,43724	11,995271
España	4381	8,562617	12,029422	3,466805	10,586887	0,533311	10,557635
Francia	5319	7,958772	12,776677	4,817905	11,600819	0,703211	11,810116
Italia	2752	7,823706	12,479104	4,655398	11,197373	0,882924	11,409437
Reino Unido	2772	10,569608	12,561959	1,992352	11,895496	0,31278	11,949131



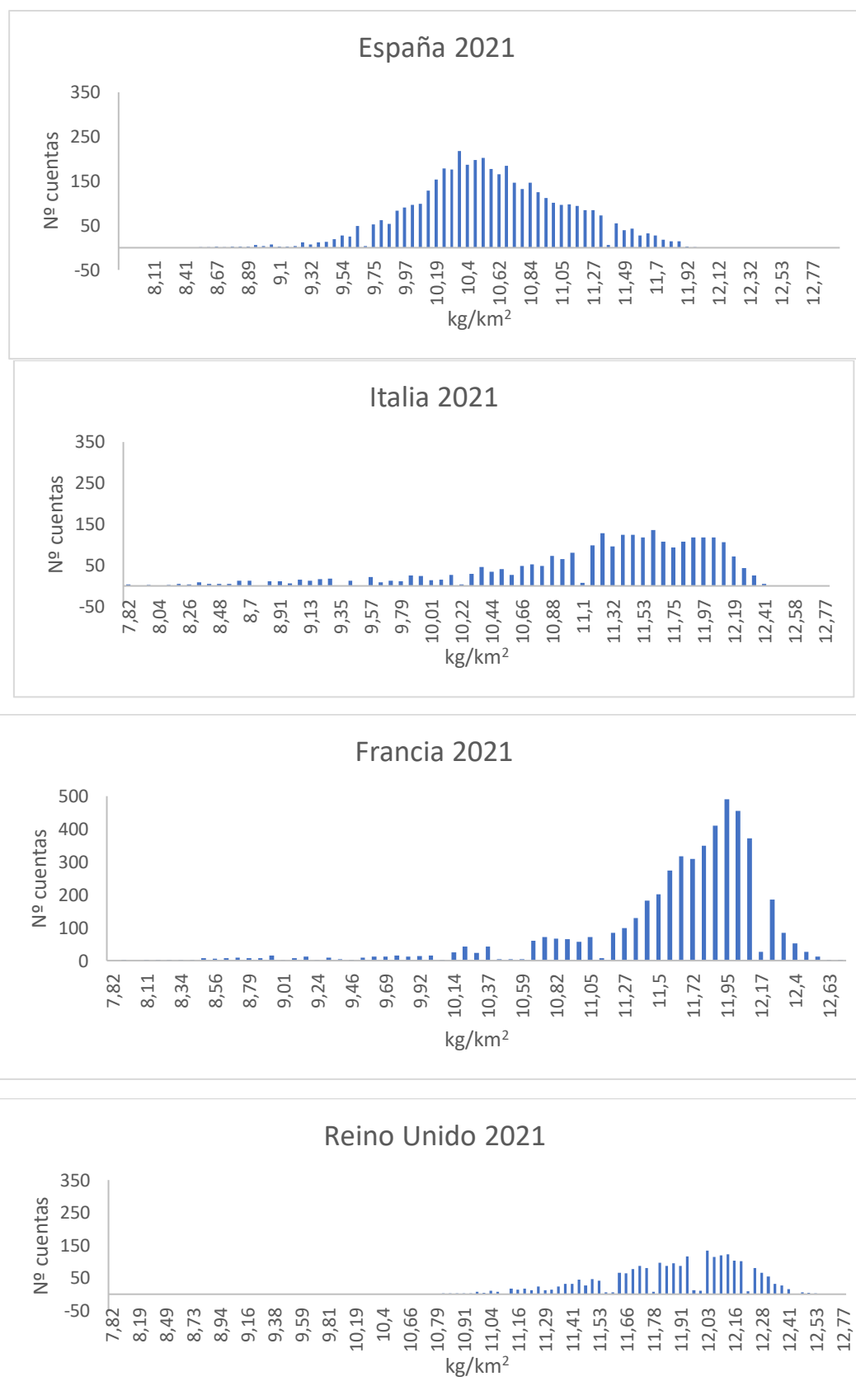


Figura 25. Conjunto de histogramas correspondientes a los valores medios de CO para el mes de abril de 2021 de Alemania, España, Francia, Italia y Reino Unido. En el eje abscisas

están los valores medios de CO expresados en kg/km^2 (área de pixel $116,28\text{km}^2$) mientras que en el eje ordenadas está representado el nº de cuentas.

En este caso ocurre algo similar a lo que ocurrió el 2019. Tanto para Alemania como para el Reino unido, sus valores medios presentan concentraciones algo superiores a las medias europeas.

3.2.4 Comparación 2019, 2020 y 2021

El análisis de los valores de CO (Figura 26) para los tres años de la comparativa presentada en el estudio muestra los valores medios de CO de los 5 países así como de Europa en abril de 2019 (azul), abril de 2020 (naranja) y abril de 2021 (verde).

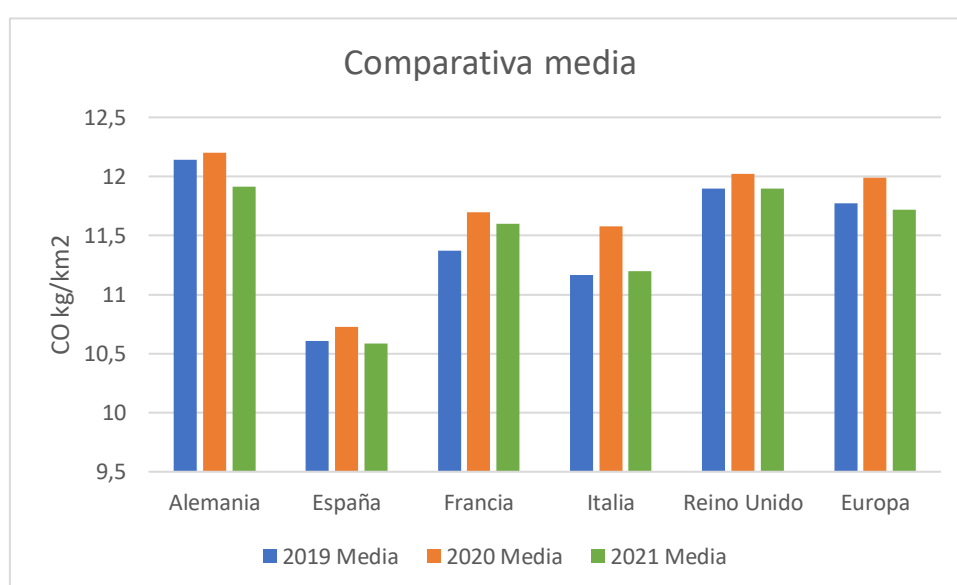


Figura 26. Gráfica correspondiente a los valores medios de CO para el mes de abril de 2019, 2020 y 2021. En el eje X se encuentran los 5 países seleccionados mientras que en el eje ordenadas están los valores medios de CO expresados en kg/km^2 .

Se puede observar que los valores medios en el año 2020 aumentan respecto a las medias del 2019 tanto a nivel europeo como en cada uno de los países. Esto no eran los resultados que a priori se esperarían dado que había cuarentenas y confinamiento en varios de estos países, por lo que en general el uso de coches disminuyó y por tanto también sus emisiones asociadas. Sin embargo hay que tener en cuenta que el CO puede llegar a permanecer hasta 3 meses aproximadamente en la atmósfera, por lo que probablemente las medidas recogidas no correspondan únicamente a las emitidas en el mes de abril. Además aunque hubiera confinamiento en algunos países debido al COVID esto no implicó una paralización completa de la industria ni mucho menos, y las medidas impuestas entre unos países y otros varían.

Otro aspecto a tener en cuenta es que la muestra de datos (únicamente el mes de abril de cada año) no es tan significativa, habiéndose tenido que descartar días y muchas medidas por cuestiones ya mencionadas como la nubosidad.

Adicionalmente, los ciclos atmosféricos, el clima, las corrientes de aire, etc pueden afectar también, por lo que podrían llegar a haberse captado también emisiones pertenecientes a otros países, a erupciones o a fenómenos geológicos.

Finalmente, en 2020 el número de incendios forestales así como las hectáreas quemadas en el territorio europeo aumentaron notablemente en el mes de abril casi duplicándose respecto al mismo mes del año 2019. Este ha podido ser otro factor que ha podido tener bastante peso en el aumento de la media de CO ese año, ya que se libera especialmente monóxido de carbono en el humo de los incendios forestales. [37][38]

4. Conclusiones

- Los códigos desarrollados han mostrado su utilidad práctica para la descarga masiva de los datos obtenidos por el sensor TROPOMI, para las fechas y el área geográfica seleccionada. Asimismo, permiten la importación de los datos en ArcGIS, facilitando el análisis espacial de los resultados. Por último, los códigos desarrollados para la mejora del geo-procesamiento de los datos facilitan el análisis masivo de la información espacial.
- El uso de sistemas del SIG y en particular de ArcGIS, han permitido analizar espacialmente la distribución de las concentraciones de CO a lo largo del territorio europeo.
- El sensor TROPOMI se ve muy afectado por la nubosidad, teniendo que descartarse multitud de datos debido a ello.
- El año con los niveles de CO más bajos a nivel europeo del área estudiada fue el 2021, con un valor medio de $11,72 \text{ kg/km}^2$, mientras que el más elevado fue el 2020 con un valor de $11,99 \text{ kg/km}^2$.
- El sensor TROPOMI es capaz de detectar el CO, sin embargo es complicado obtener datos que se sepa con certeza que corresponden a una fecha en concreto de este gas.
- Se han comparado las concentraciones de CO en abril de 2019, 2020 y 2021 para analizar la influencia de la pandemia de COVID-19 y se concluye que no ha tenido un impacto perceptible a través de los presentes datos extraídos.

REFERENCIAS

- [1] Naciones Unidas (2023). Referencia web: <https://www.un.org/es/global-issues>. Última entrada 12 de julio de 2023.
- [2] Earth Science Communications Team at NASA's Jet Propulsion Laboratory (2023). Referencia web: <https://climate.nasa.gov/global-warming-vs-climate-change/#:~:text=Climate%20change%20is%20a%20long,are%20synonymous%20with%20the%20term>. Última entrada 27 de julio de 2023.
- [3] National Geographic Society (2023). Referencia Web: <https://education.nationalgeographic.org/resource/all-about-climate/>. Última entrada 27 de julio de 2023.
- [4]. Cambio Climático, Naciones Unidas (2023). referencia Web: <https://www.un.org/es/climatechange>. Última entrada 4 de agosto de 2023.
- [5] Consejo de Europa (2023). Referencia Web: <https://www.consilium.europa.eu/es/topics/climate-neutrality>. Última Entrada 08-07-2023.
- [6] Martínez, J. G. (2019). Ciencia contra el cambio climático. Ediciones EL PAÍS S.L. Referencia Web: https://elpais.com/elpais/2019/12/09/ciencia/1575883466_256047.html
- [7] Ripple, W.J., Wolf, Ch., Newsome, Th. M., Barnard, Ph., Moomaw, W.R, (2019). <https://doi.org/10.1093/biosci/biz088> BioScience, Volume 70, Issue 1, January 2020, Pages 8–12,
- [8] Gutiérrez Llorente, J.M., Ribalaygua, J., Llasat, M.C., Romero, R., Abaurrea, J., Rodríguez, E. (2012). Escenarios-PNACC 2012: descripción y análisis de los resultados de regionalización estadística En: Rodríguez, C., Ceballos, A., González Reviriego, N., Morán, E., Hernández, A. (eds.). Cambio climático. Extremos e impactos. Madrid: Asociación Española de Climatología, 2012, p. 125-136
- [9] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, MTERD (2023). Referencia Web: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/Preguntas_frecuentes_Calidad_Aire.aspx. última entrada 18_07_2023.
- [10] Calidad del aire Cantabria (2023). Referencia Web: <https://airecantabria.com/>. última consulta 18_03_2023.
- [11] Satélites de observación meteorológica , Wikipedia (2023). Referencia Web: https://es.wikipedia.org/wiki/Sat%C3%A9lite_meteorol%C3%B3gico. Última consulta 18_07_2023.

- [12] NOAA (2016). Referencia Web: <https://www.climate.gov/news-features/climate-qa/%C2%BFqu%C3%A9-emite-m%C3%A1s-di%C3%B3xido-de-carbono-%C2%BFlos-volcanes-o-la-actividad-humana>, última entrada, 19-07-2023.
- [13] GERLACH, Terry. Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2011, vol. 92, no 24, p. 201-202.
- [14] Boden, T.A., Marland, G., Andres, R.J. (2015). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- [15] COOK, John. Understanding and countering misinformation about climate change. *Research Anthology on Environmental and Societal Impacts of Climate Change*, 2022, p. 1633-1658.
- [16] Castañeda, I. (2022). Análisis de la contribución de las erupciones volcánicas (Cumbre Vieja, 2021) al balance de gases en la atmósfera mediante medidas registradas por Sentinel-5P. Universidad de Cantabria
- [17] NASA (2019). Referencia Web: <https://www.youtube.com/watch?v=MxBg5ZMH2nM&list=PLiuUQ9asub3Q5kUrRyYIANMz-17DTPHzg&index=3>. Última consulta 02- 11, 2022.
- [18] Levelt, P. F., Stein Zweers, D. C., Aben, I., Bauwens, M., Borsdorff, T., De Smedt, I., Eskes, H. J., Lerot, C., Loyola, D. G., Romahn, F., Stavrou, T., Theys, N., Van Roozendael, M., Veefkind, J. P., & Verhoelst, T. (2022). Air quality impacts of COVID-19 lockdown measures detected from space using high spatial resolution observations of multiple trace gases from Sentinel-5P/TROPOMI. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(15), 10319-10351. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10319-2022>
- [19] CIDOB- Crisis sanitaria del COVID-19: la respuesta de Europa contra la pandemia. (s. f.). CIDOB. Recuperado 10 de agosto de 2023, de https://www.cidob.org/biografias_lideres_politicos/organismos/union_europea/covid_19_la_respuesta_de_europa_contra_la_pandemia_2020
- [20] Las aplicaciones de la tecnología satelital. (2021, mayo 18). Darwin Innovación- Darwin Innovation Group. <https://darwincav.com/es/the-applications-of-satellite-technology/>
- [21] About Copernicus. (s. f.). Copernicus.Eu. Recuperado 10 de agosto de 2023, de <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>
- [22] Referencia Web. Satélites. Uva.es. Recuperado 10 de agosto de 2023, de https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/EMC/trabajos_02_03/RADIOASTRONOMIA/web/Indice/S_art/I_s_art/3_5/Usos.htm
- [23] Sergieieva, K. (2023, abril 26). Tipos De Satélites: Diferencias En Sus Funciones Y Utilidad. EOS Data Analytics. <https://eos.com/es/blog/tipos-de-satelites/>

[24] *Tipos de órbitas satelitales* (2016) por Negocios Contra la Obsolescencia [Diagrama]
<https://www.negocioscontralaobsolescencia.com/tecnologia/la-apasionante-aventura-de-mantener-con-vida-un-satelite>

[25] open basis. (s. f.). Copernicus is the Earth Observation component of the European Union's and. Copernicus.eu. Recuperado 13 de agosto de 2023, de
<https://www.copernicus.eu/sites/default/files/2023-07/Copernicus%20General%20EN.pdf>

[26] Sentinel-5- missions- sentinel online. (s. f.). Sentinel Online. Recuperado 14 de agosto de 2023, de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5>

[27] Orbit- sentinel-5- sentinel online. (s. f.). Sentinel Online. Recuperado 13 de agosto de 2023, de <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5/satellite-description/orbit>

[28] 2019). ARSET- High Resolution NO2 Monitoring From Space with TROPOMI. NASA Applied Remote Sensing Training Program (ARSET): <http://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-high-resolution-no2-monitoring-space-tropomi>

[29] The European Space Agency (ESA). (s.f.). Sentinel Online: Sentinel-5P: Geographical Coverage. Recuperado el 7 de agosto de 2023 de:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/geographical-coverage>

[30] The European Space Agency (ESA). (s.f.). Sentinel-5P, TROPOMI: Instrument-Description. Recuperado el 7 de agosto de 2023 de:
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/instrument/description>

[31] PuraData. (13 de octubre de 2017). Sentinel-5P ya está en el espacio. Recuperado el 8 de agosto de 2023 de:<https://puradata.com.ar/sentinel-5p-ya-esta-espacio/>

[32] The European Space Agency (ESA). (s.f.). Sentinel Online: Sentinel-5P: Data Products. Recuperado el 10 de agosto de 2023 de:
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products>

[33] Sentinel-5 precursor/TROPOMI level 2 product user manual aerosol optical thickness. (s. f.). S5p-pal.com. Recuperado 13 de agosto de 2023, de https://data-portal.s5p-pal.com/product-docs/aot/s5p_aot_pum_pal_v1.1.0_signed.pdf

[34]-15 product version. (s. f.). S5P mission performance centre carbon monoxide [L2_CO ____] readm e. Copernicus.eu. Recuperado 13 de agosto de 2023, de
<https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-Carbon-Monoxide-Level-2-Product-Readme-File>

[36] Álvarez Rodríguez, Javier (2011). *Estimación de la distribución espacial de la precipitación en zonas montañosas mediante métodos geoestadísticos*. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.8820>.

[37] (S. f.-b). Amazonaws.com. Recuperado 3 de septiembre de 2023, de https://effis-gwis-cms.s3.eu-west-1.amazonaws.com/effis/reports-and-publications/annual-fire-reports/2019_Fire_Report_HighRes_final_PTcorrection/Annual_Report_2019_final_topdf_2.pdf

[38] (S. f.-b). Amazonaws.com. Recuperado 3 de septiembre de 2023, de https://effis-gwis-cms.s3.eu-west-1.amazonaws.com/effis/reports-and-publications/effis-related-publications/Advance_EFFIS_Report+on+Forest+Fires+in+Europe_2020_210401xv_finalv2.pdf

Anexo

A. Códigos

1. Código para la descarga automática de los archivos

```
1. from sentinelsat import SentinelAPI, read_geojson, geojson_to_wkt
2. from datetime import date
3. import os
4.
5. # Datos de acceso a la API de Copernicus
6. api = SentinelAPI('s5pguest', 's5pguest', 'https://s5phub.copernicus.eu/dhus')
7.
8. # Definición de la región de interés
9. footprint_geojson = {
10.     "type": "Polygon",
11.     "coordinates": [[
12.         [8.091957290702958, 44.928277444275665],
13.         [11.370569916421735, 44.928277444275665],
14.         [11.370569916421735, 46.023557355371],
15.         [8.091957290702958, 46.023557355371],
16.         [8.091957290702958, 44.928277444275665]
17.     ]]
18. }
19. footprint = geojson_to_wkt(footprint_geojson)
20.
21. # Definición de fechas de búsqueda
22. start_date = date(2019, 4, 1)
23. end_date = date(2019, 4, 6)
24. cloudcover_percentage = (0, 25)
25.
26. # Consulta de productos en la API de Copernicus
27. products = api.query(
28.     footprint,
29.     date=(start_date, end_date),
30.     platformname='Sentinel-5',
31.     producttype='L2_CO_____',
32.     processinglevel='L2',
33.     processingmode='Offline'
34. )
35.
36. # Descarga de productos
37. api.download_all(products, directory_path='archivos')
38.
```

2. Código de NASA ARSET para el procesamiento de los archivos en bruto transformándolos en formato .CSV.

```
1. #!/usr/bin/python
2. '''
```

```

3. Module: read_TROPOMI_no2_and_dump_ascii.py
4. =====
   =====
5. Disclaimer: The code is for demonstration purposes only. Users
   are responsible to check for accuracy and revise to fit their
   objective.
6.
7. Author: Justin Roberts-Pierel, 2015
8. Organization: NASA ARSET
9. Purpose: To print all SDS from an TROPOMI file
10.
11. Modified by Vikalp Mishra & Pawan Gupta, May 10 2019 to read
   TROPOMI data
12. =====
   =====
13. '''
14. #!/usr/bin/python
15. from netCDF4 import Dataset
16. import numpy as np
17. import sys
18. import time
19. import calendar
20. import datetime as dt
21. import pandas as pd
22.
23.
24. #This finds the user's current path so that all hdf4 files can
   be found
25. try:
26.     fileList=open('fileList.txt','r')
27. except:
28.     print('Did not find a text file containing file names
   (perhaps name does not match)')
29.     sys.exit()
30.
31. #loops through all files listed in the text file
32. for FILE_NAME in fileList:
33.     FILE_NAME=FILE_NAME.strip()
34.     user_input=input('\nWould you like to process\n' +
   FILE_NAME + '\n\n(Y/N) ')
35.     if(user_input == 'N' or user_input == 'n'):
36.         print('Skipping...')
37.         continue
38.     else:
39.         file = Dataset(FILE_NAME, 'r')
40.         grp='PRODUCT'
41.         # read the data
42.         if 'CO' in FILE_NAME:
43.             print('This is a TROPOMI CO file.')
44.             #this is how you access the data tree in an hdf5
   file
45.             SDS_NAME='carbonmonoxide_total_column'
46.         elif 'AER_AI' in FILE_NAME:
47.             print('This is a TROPOMI Aerosol Index file.')
48.             SDS_NAME='aerosol_index_354_388'
49.             ds=file

```

```

50.         grp='PRODUCT'
51.         lat= ds.groups[grp].variables['latitude'][0][:][:]
52.         lon= ds.groups[grp].variables['longitude'][0][:][:]
53.         data= ds.groups[grp].variables[SDS_NAME]
54.
55.         #get necessary attributes
56.         fv=data._FillValue
57.
58.         #get scan time and turn it into a vector
59.         scan_time= ds.groups[grp].variables['time_utc']
60.         # scan_time=geolocation['Time'][:].ravel()
61.
62.         year = np.zeros(lat.shape)
63.         mth = np.zeros(lat.shape)
64.         doy = np.zeros(lat.shape)
65.         hr = np.zeros(lat.shape)
66.         mn = np.zeros(lat.shape)
67.         sec = np.zeros(lat.shape)
68.
69.         for i in range(0,lat.shape[0]):
70.             t = scan_time[0][i].split('.')[0]
71.             t2 = dt.datetime.strptime(t,'%Y-%m-%dT%H:%M:%S')
72.             y = t2.year
73.             m = t2.month
74.             d = t2.day
75.             h = t2.hour
76.             m = t2.minute
77.             s = t2.second
78.
79.             year[i][:] = y
80.             mth[i][:] = m
81.             doy[i][:] = d
82.             hr[i][:] = h
83.             mn[i][:] = m
84.             sec[i][:] = s
85.
86.         vlist = list(file[grp].variables.keys())
87.
88.         df = pd.DataFrame()
89.         df['Year'] = year.ravel()
90.         df['Month'] = mth.ravel()
91.         df['Day'] = doy.ravel()
92.         df['Hour'] = hr.ravel()
93.         df['Minute'] = mn.ravel()
94.         df['Second'] = sec.ravel()
95.
96.         #This for loop saves all of the SDS in the dictionary
        at the top (dependent on file type) to the array (with titles)
97.         for i in range(0,len(vlist)):
98.             SDS_NAME=vlist[(i)] # The name of the sds to read
99.             #get current SDS data, or exit program if the SDS
        is not found in the file
100.            #try:
101.            sds=ds.groups[grp].variables[SDS_NAME]
102.            if len(sds.shape) == 3:
103.                print(SDS_NAME,sds.shape)

```

```

104.         #get attributes for current SDS
105.         if 'qa' in SDS_NAME:
106.             scale=sds.scale_factor
107.         else: scale = 1.0
108.         fv=sds._FillValue
109.
110.         #get SDS data as a vector
111.         data=sds[:].ravel()
112.         #The next few lines change fill value/missing
        value to NaN so that we can multiply valid values by the scale
        factor, then back to fill values for saving
113.         data=data.astype(float)
114.         data=(data)*scale
115.         data[np.isnan(data)]=fv
116.         data[data==float(fv)]=np.nan
117.
118.         df[SDS_NAME] = data
119.
120.         outfilename=FILE_NAME[:-3]+'.csv'
121.         df.to_csv(outfilename, index = False)
122.         print('\nAll files have been saved successfully.')

```

3. Código para cambiar el formato de los .CSV para que ArcGIS Pro los reconozca

```

2. import csv
3. import os
4.
5. # Carpeta de entrada
6. input_folder = r"C:\Users\Usuario\Desktop\SofiaTFG\descargas\dat
os_transformados\datos_transformados_2019"
7.
8. # Carpeta de salida
9. output_folder = r"C:\Users\Usuario\Desktop\SofiaTFG\descargas\da
tos_transformados\transformados_python_2019"
10.
11.     # Si la carpeta de salida no existe, la creamos
12.     if not os.path.exists(output_folder):
13.         os.makedirs(output_folder)
14.
15.     # Procesamos todos los archivos CSV en la carpeta de entrada
16.     for filename in os.listdir(input_folder):
17.         if filename.endswith(".csv"):
18.             # Abrimos el archivo de entrada
19.             with open(os.path.join(input_folder, filename), new
line='') as input_file:
20.                 reader = csv.reader(input_file, delimiter=',')
21.                 # Leemos los encabezados y los datos
22.                 headers = next(reader)
23.                 rows = [row for row in reader]
24.
25.             # Convertimos las columnas 8 y 9 a números decimales
26.             for row in rows:
27.                 if len(row) > 10:

```

```

28.         row[8] = row[8].replace(',', ' ')
29.         row[9] = row[9].replace(',', ' ')
30.         row[-2] = float(row[-2]) if row[-2] else 0.0
31.         row[-2] = float(row[-2])
32.         row[-1] = float(row[-1]) if row[-1] else 0.0
33.         row[-1] = float(row[-1])
34.
35.         # Creamos el archivo de salida con los datos
    procesados
36.         output_file_path = os.path.join(output_folder, file
    name)
37.         with open(output_file_path, mode='w', newline='') a
    s output_file:
38.             writer = csv.writer(output_file, delimiter=',')
39.             writer.writerow(headers)
40.             for row in rows:
41.                 writer.writerow(row)
42.

```

4. Código para acortar los nombres de los archivos

```

1. import os
2.
3. folder_path = "C:\\Users\\Usuario\\Desktop\\SofiaTFG\\descargas\\
    \\datos_transformados\\transformados_python_2019"
4.
5. string_to_remove = "S5P_OFFFL_L2__CO_____"
6.
7. for filename in os.listdir(folder_path):
8.     if os.path.isfile(os.path.join(folder_path, filename)):
9.         # Renombrar el archivo eliminando la cadena específica
10.        new_filename = filename.replace(string_to_remove, "")
11.        os.rename(os.path.join(folder_path, filename), os.pat
    h.join(folder_path, new_filename))
12.

```

5. Código para transformar las tablas en puntos en ArcGIS Pro

```

1. import arcpy
2.
3. def tablas_a_puntos_masivo(input_csv, output_gdb):
4.     # To allow overwriting outputs change overwriteOutput option
    to True.
5.     arcpy.env.overwriteOutput = False
6.
7.     # Obtener el nombre del archivo CSV sin la extensión
8.     csv_name = input_csv.split(".")[0]
9.
10.    # Crear la ruta completa para el resultado
11.    output_fc = f"{output_gdb}\\{csv_name}_XYTableToPoint"
12.
13.    # Ejecutar XY Table To Point en el archivo CSV
14.    arcpy.management.XYTableToPoint(

```

```

15.         in_table=input_csv,
16.         out_feature_class=output_fc,
17.         x_field="longitude",
18.         y_field="latitude",
19.         z_field="carbonmonoxide_total_column",
20.         coordinate_system="GEOGCS['GCS_WGS_1984',DATUM['D_
WGS_1984',SPHEROID['WGS_1984',6378137.0,298.257223563]],PRIMEM['
Greenwich',0.0],UNIT['Degree',0.0174532925199433]]"
21.     )
22.
23.     if __name__ == '__main__':
24.         # Ruta de la geodatabase donde se guardarán los
resultados
25.         output_gdb = r"C:\\Users\\Usuario\\Documents\\ArcGIS\\P
rojects\\TFG_Sofia_CO_2019\\TFG_Sofia_CO_2019.gdb"
26.
27.         # Ruta de la capa "Recortes_filtrados"
28.         recortes_filtrados_layer = r"C:\path\to\your\geodatabas
e.gdb\Recortes_filtrados"
29.
30.         # Obtener la lista de archivos CSV en la capa
"Recortes_filtrados"
31.         input_csv_list = []
32.         for dirpath, dirnames, filenames in
arcpy.da.Walk(recortes_filtrados_layer, datatype="Table"):
33.             for filename in filenames:
34.                 if filename.endswith(".csv"):
35.                     input_csv_list.append(os.path.join(dirpath
, filename))
36.
37.         # Iterar a través de la lista de archivos CSV y ejecutar
la función
38.         for input_csv in input_csv_list:
39.             tablas_a_puntos_masivo(input_csv, output_gdb)
40.
41.         print("Proceso completado para todos los archivos CSV en
la capa 'Recortes_filtrados'.")

```

6. Código para el descarte de medidas con qa_value poco fiable

```

1. import arcpy
2.
3. def remove_zero_qa_values(input_layer):
4.     # Crear una lista para almacenar los nombres de los archivos
procesados
5.     processed_files = []
6.
7.     # Definir el cursor para recorrer los datos
8.     with
arcpy.da.UpdateCursor(input_layer, ["qa_value"]) as cursor:
9.         for row in cursor:
10.             if row[0] == 0:
11.                 cursor.deleteRow()

```

```

12.         processed_files.append(input_layer.name)
13.
14.     return processed_files
15.
16.     if __name__ == '__main__':
17.         # Obtener la capa de puntos a procesar
18.         project = arcpy.mp.ArcGISProject("CURRENT")
19.         map = project.listMaps()[0]
20.
21.         # Lista para almacenar los nombres de los archivos
procesados
22.         processed_files_list = []
23.
24.         # Buscar la capa en el mapa
25.         for layer in map.listLayers():
26.             if layer.name == "Chinchetas Año 2019":
27.                 input_layer = layer
28.                 processed_files = remove_zero_qa_values(input_
layer)
29.                 processed_files_list.extend(processed_files)
30.
31.                 if processed_files_list:
32.                     print("Se han eliminado los datos con qa_value igual
a 0 en los siguientes archivos:")
33.                     for filename in processed_files_list:
34.                         print(filename)
35.                 else:
36.                     print("No se encontró la capa de puntos.")

```

7. Código para la transformación de las unidades de la columna de CO

```

1. import arcpy
2.
3. def Model7(input_layer): # Model 7
4.
5.     # To allow overwriting outputs, change overwriteOutput option
to True.
6.     arcpy.env.overwriteOutput = False
7.
8.     # Process: Calculate Field (Calculate Field) (management)
9.     output_layer = arcpy.management.CalculateField(
10.         in_table=input_layer,
11.         field="concentracion_CO",
12.         expression="(!carbonmonoxide_total_column! /
10000)*28.01*1000*116.28",
13.         expression_type="PYTHON3",
14.         code_block="",
15.         field_type="DOUBLE",
16.         enforce_domains="NO_ENFORCE_DOMAINS"
17.     )[0]
18.
19.     return output_layer
20.

```

```

21.     if __name__ == '__main__':
22.         arcpy.env.workspace = r"C:\\Users\\Usuario\\Documents\\
\\ArcGIS\\Projects\\TFG_Sofia_CO_2019\\TFG_Sofia_CO_2019.gdb"
23.
24.         project = arcpy.mp.ArcGISProject("CURRENT")
25.         map = project.listMaps()[0]
26.
27.         group_layer_name = "Recortes_filtrados"
28.         group_layer = None
29.
30.         # Buscar el Group Layer en el mapa
31.         for layer in map.listLayers():
32.             if layer.isGroupLayer and layer.name == group_laye
r_name:
33.                 group_layer = layer
34.                 break
35.
36.         if group_layer:
37.             # Iterar sobre las capas dentro del Group Layer
38.             for layer in group_layer.listLayers():
39.                 output_layer = Model7(layer)
40.                 print(f"Tarea ejecutada para la capa:
{output_layer}")
41.             else:
42.                 print(f"No se encontró el Group Layer:
{group_layer_name}")s_a_puntos_masivo()

```

8. Código para recorte del área deseada

```

1. import arcpy
2.
3. def clip_points_layer(input_layer, clip_feature, output_gdb):
4.     # Nombre del archivo de salida recortado
5.     output_name = f"{input_layer.name}_recortado"
6.
7.     # Ruta completa del archivo de salida en la geodatabase
8.     output_clip = f"{output_gdb}\\{output_name}"
9.
10.    # Realizar el recorte
11.    arcpy.analysis.Clip(input_layer, clip_feature, output_c
lip)
12.
13.    print(f"Capa recortada creada: {output_clip}")
14.
15.    if __name__ == '__main__':
16.        # Ruta de la geodatabase donde se guardarán los
resultados recortados
17.        output_gdb = arcpy.env.workspace # Utiliza el espacio de
trabajo actual
18.
19.        # Ruta del archivo de recorte "Rectángulo.shp"
20.        clip_feature = "Rectángulo.shp"
21.

```

```

22.         # Obtener la capa de puntos a recortar
23.     project = arcpy.mp.ArcGISProject("CURRENT")
24.     map = project.listMaps()[0]
25.     input_layer = None
26.
27.     # Buscar la capa en el mapa
28.     for layer in map.listLayers():
29.         if layer.name == "Chinchetas_año_2019":
30.             input_layer = layer
31.             break
32.
33.     if input_layer:
34.         # Recortar la capa de puntos
35.         clip_points_layer(input_layer, clip_feature, output
36. _gdb)
37.     else:
38.         print("No se encontró la capa de puntos.")

```

9. Código para la transformación de puntos a IDW

```

1. import arcpy
2.
3. def IDW_for_GroupLayer(group_layer_name, output_gdb):
4.     # Check out any necessary licenses.
5.     arcpy.CheckOutExtension("3D")
6.     arcpy.CheckOutExtension("spatial")
7.
8.     # Obtener el Group Layer
9.     project = arcpy.mp.ArcGISProject("CURRENT")
10.    map = project.listMaps()[0]
11.    group_layer = None
12.
13.    # Buscar el Group Layer en el mapa
14.    for layer in map.listLayers():
15.        if layer.isGroupLayer and
16. layer.name == group_layer_name:
17.            group_layer = layer
18.            break
19.
20.    if group_layer:
21.        # Iterar sobre las capas dentro del Group Layer
22.        for layer in group_layer.listLayers():
23.            # Establecer el nombre para el resultado del IDW
24.            output_name = f"{layer.name}_CO_kg_m3"
25.
26.            # Ruta completa del resultado del IDW en la
27. geodatabase
28.            output_idw = f"{output_gdb}\\{output_name}"
29.
30.            # Ejecutar el IDW

```

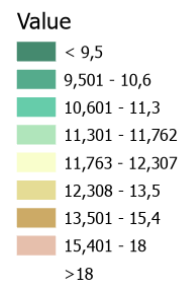
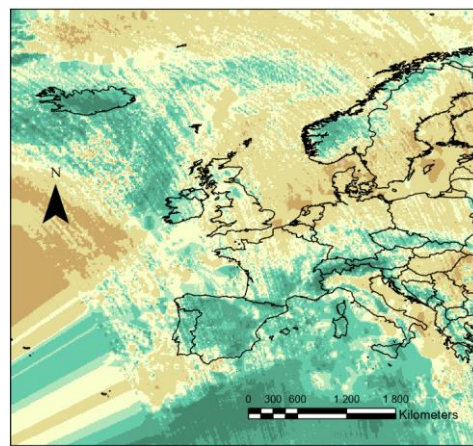
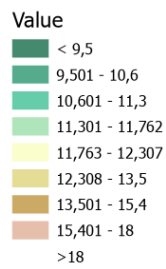
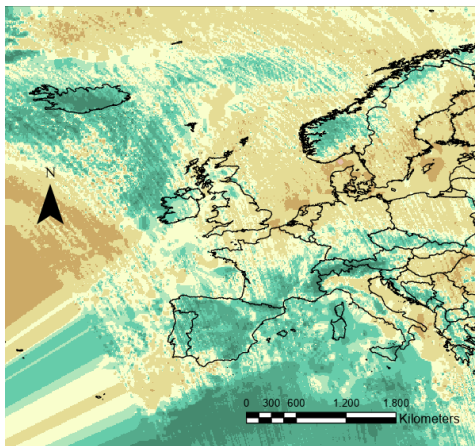
```

29.         idw_result = arcpy.sa.Idw(in_point_features=layer, z_field="CO_kg_m3", cell_size="0,11", power=2, search_radius="VARIABLE 12", in_barrier_polyline_features="")
30.
31.         # Guardar el resultado del IDW en la geodatabase
32.         idw_result.save(output_idw)
33.
34.         print(f"IDW ejecutado para la capa: {layer.name}")
35.     else:
36.         print(f"No se encontró el Group Layer: {group_layer_name}")
37.
38.     if __name__ == '__main__':
39.         # Ruta de la geodatabase donde se guardarán los resultados del IDW
40.         output_gdb = r"C:\\Users\\Usuario\\Documents\\ArcGIS\\Projects\\TFG_Sofia_CO_2019\\TFG_Sofia_CO_2019.gdb"
41.
42.         # Nombre del Group Layer a procesar
43.         group_layer_name = "Recortes_filtrados"
44.
45.         # Ejecutar el IDW para todas las capas dentro del Group Layer
46.         IDW_for_GroupLayer(group_layer_name, output_gdb)

```

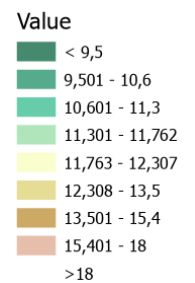
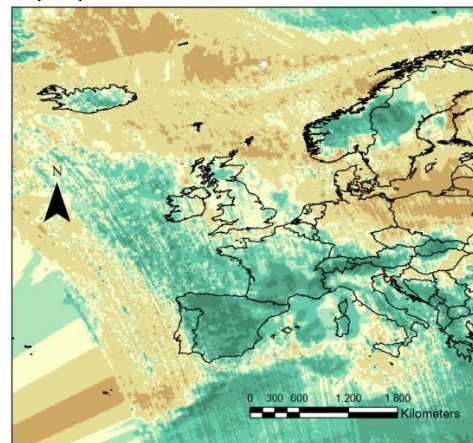
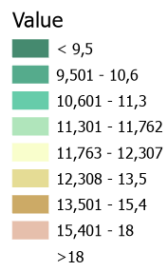
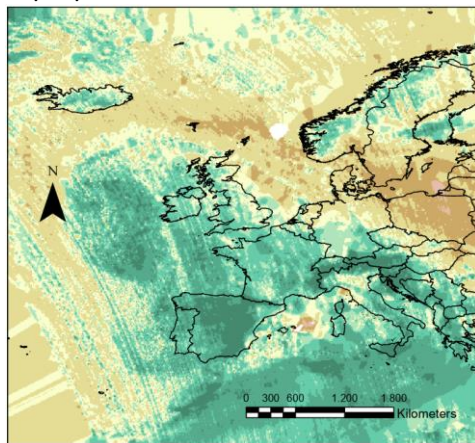
B. Mapas

Abril año 2019



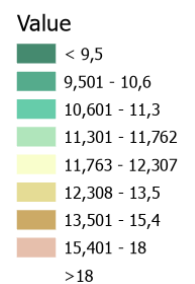
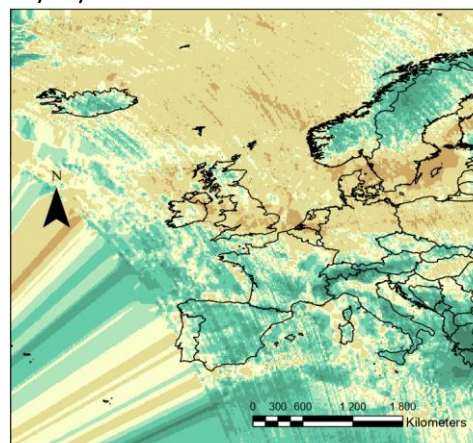
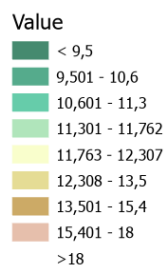
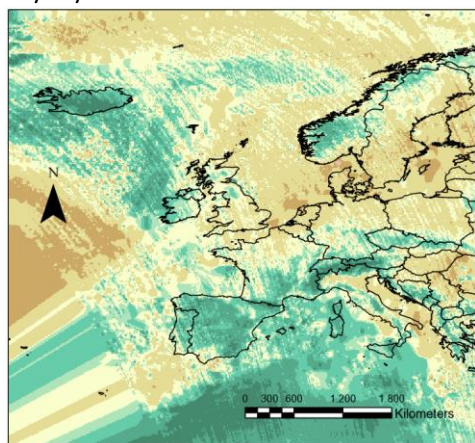
01/04/2019

04/04/2019



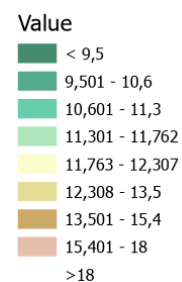
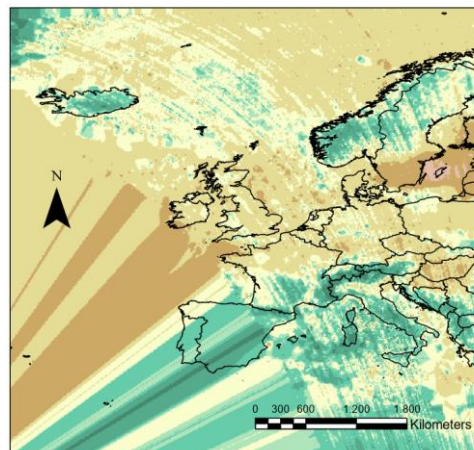
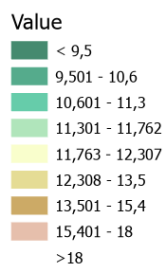
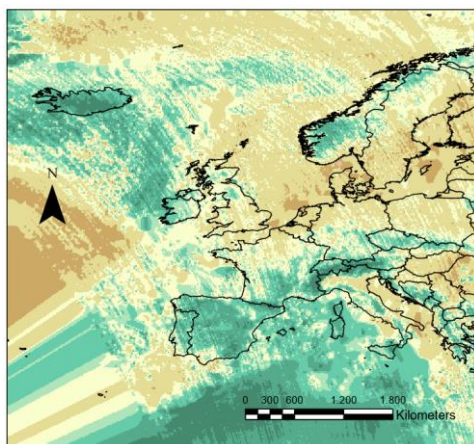
05/04/2019

06/04/2019



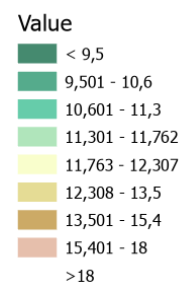
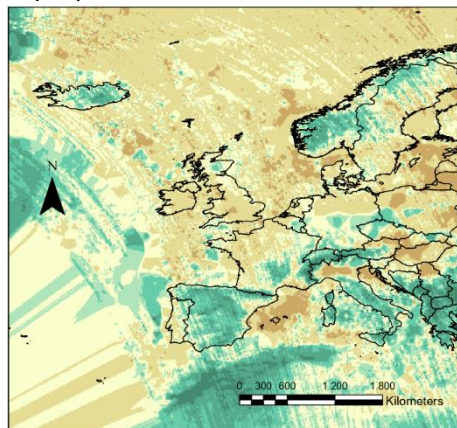
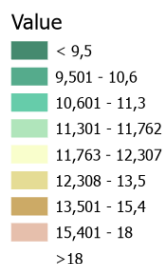
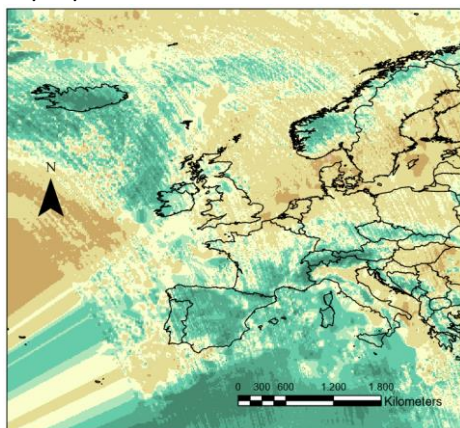
07/04/2019

08/04/2019



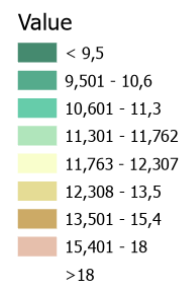
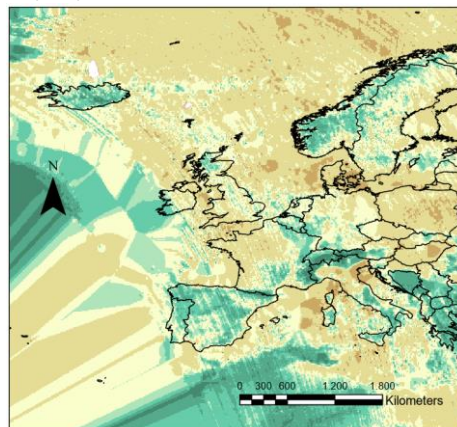
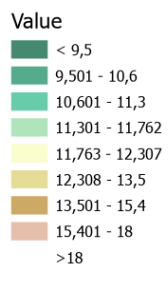
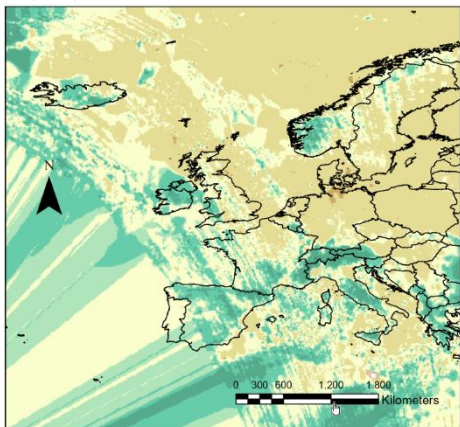
09/04/2019

10/04/2019



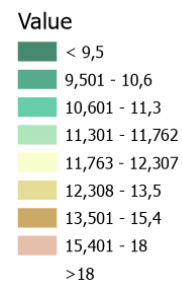
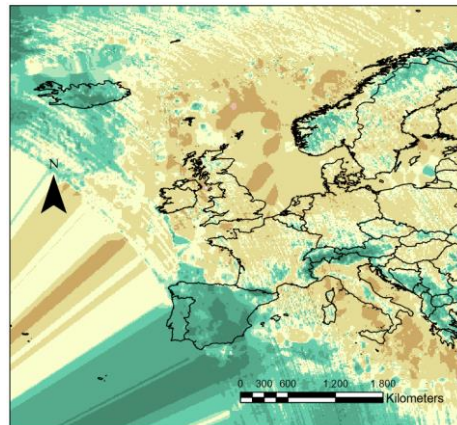
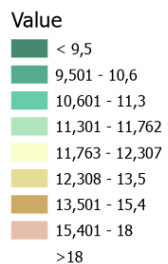
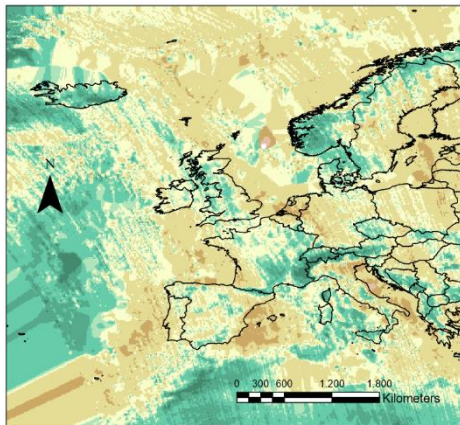
11/04/2019

12/04/2019

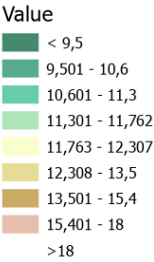
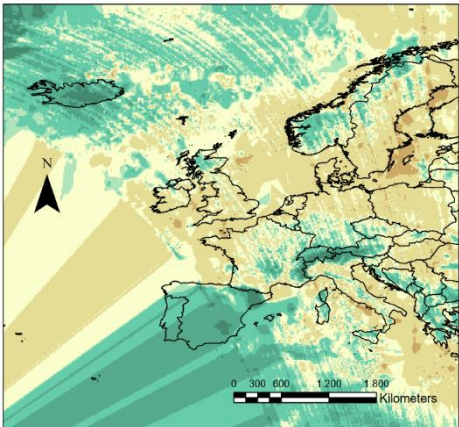


13/04/2019

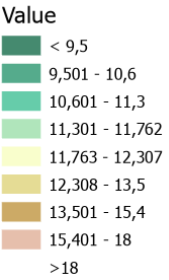
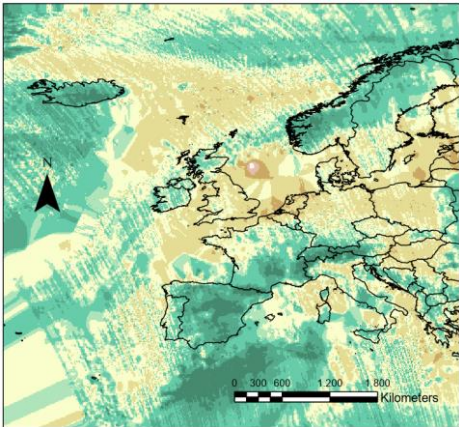
14/04/2019



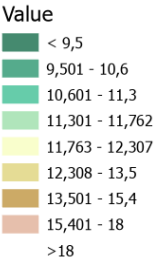
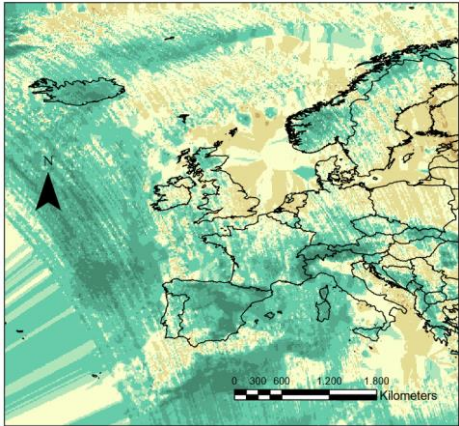
16/04/2019



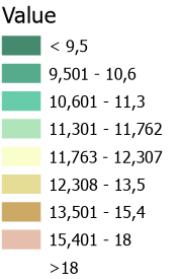
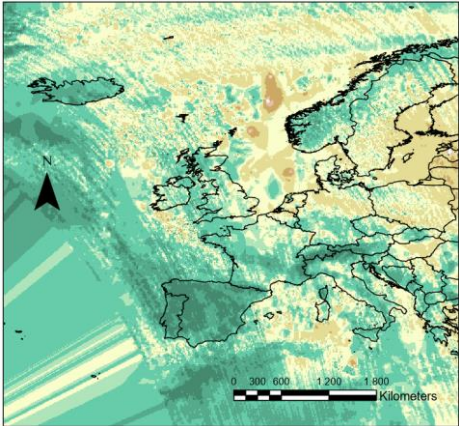
19/04/2019



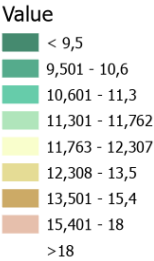
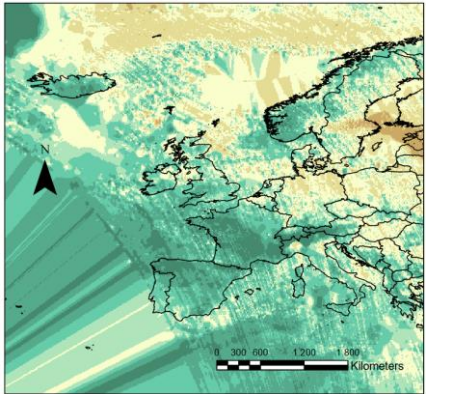
20/04/2019



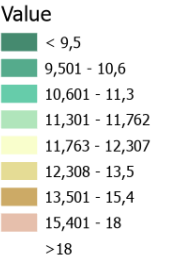
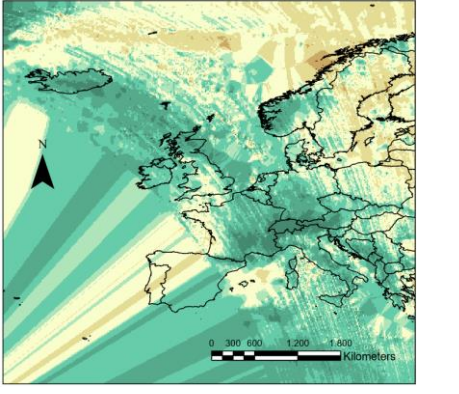
21/04/2019



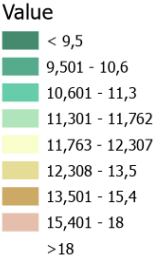
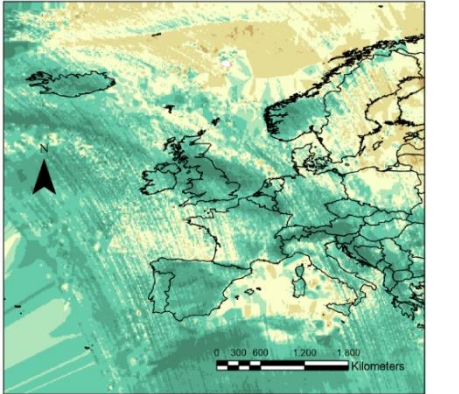
22/04/2019



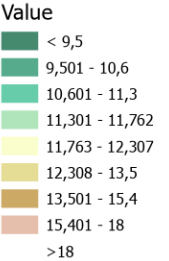
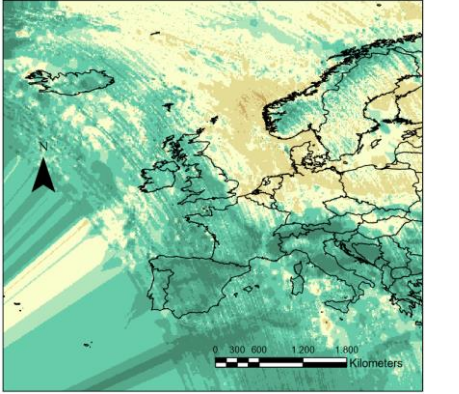
23/04/2019



24/04/2019



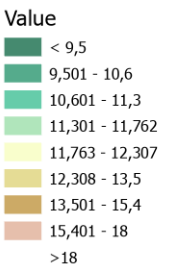
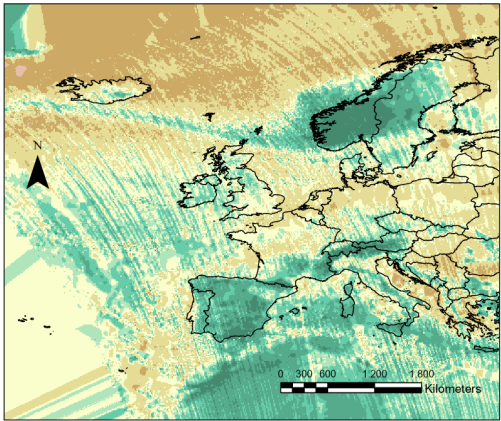
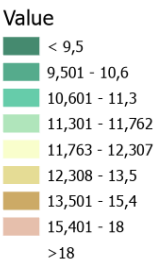
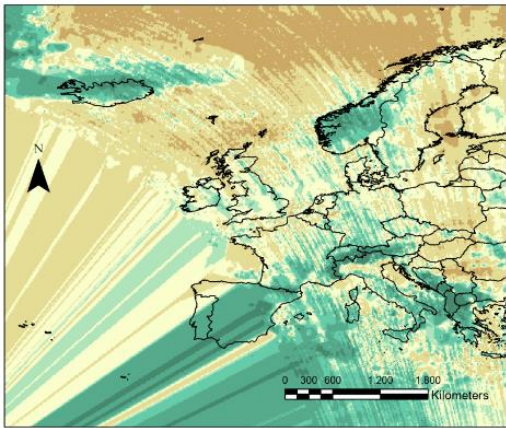
26/04/2019



27/04/2019

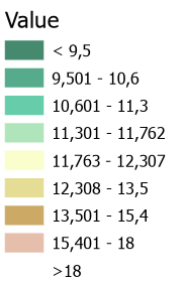
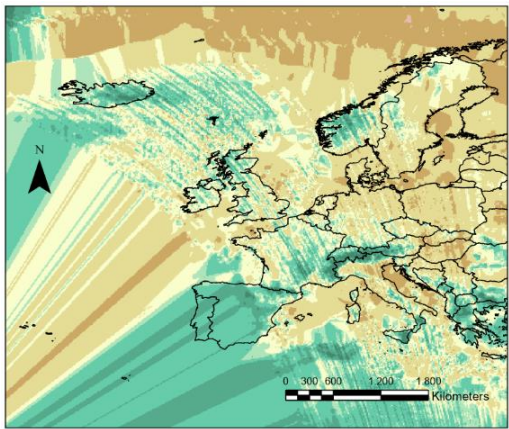
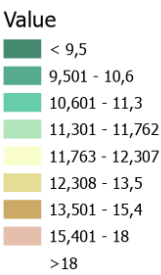
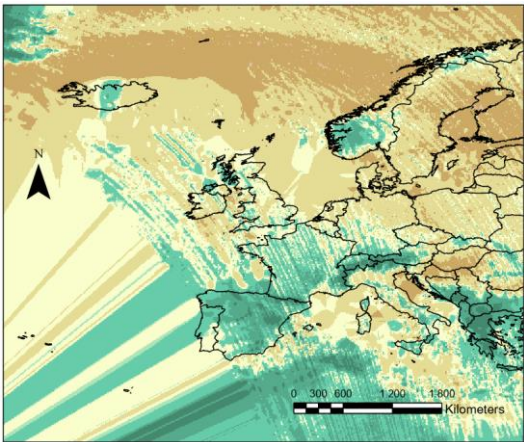
29/04/2019

Abril año 2020



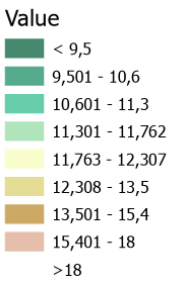
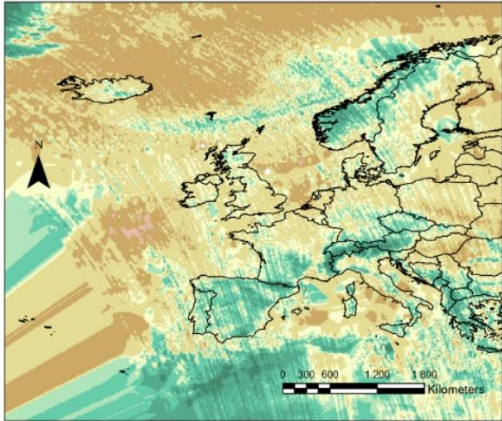
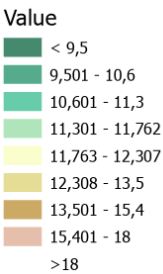
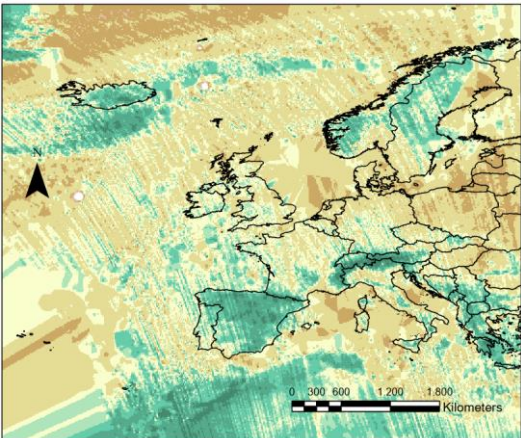
01/04/2020

02/04/2020



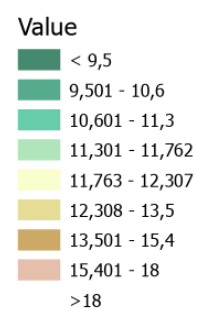
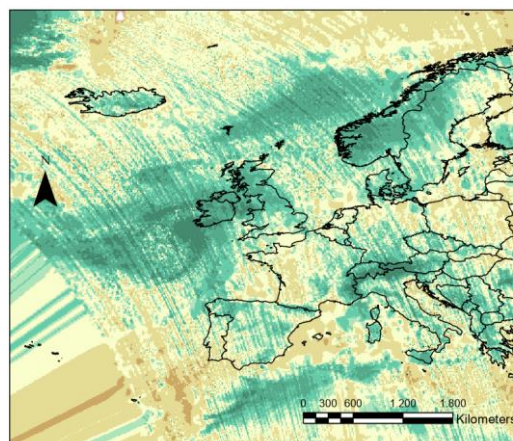
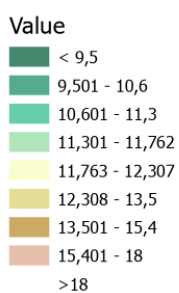
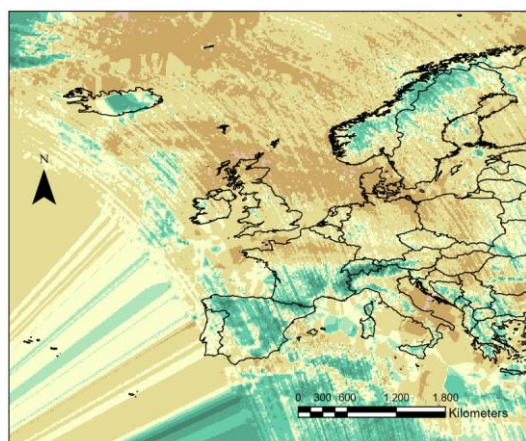
05/04/2020

06/04/2020



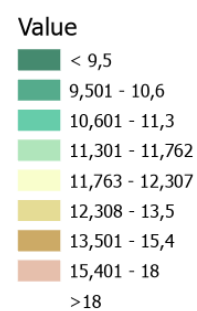
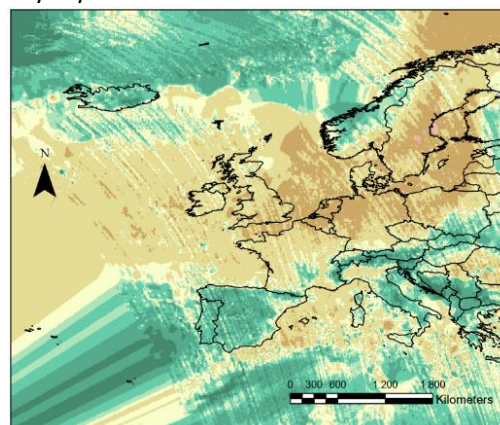
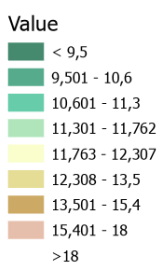
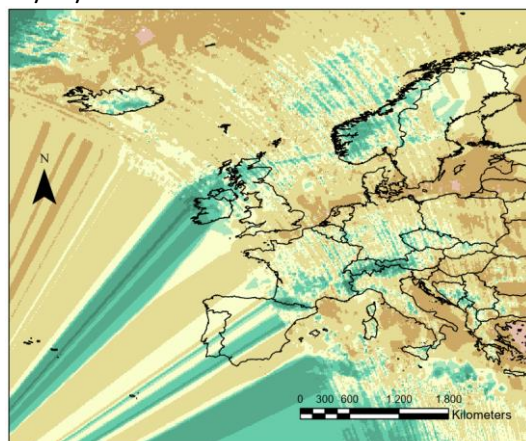
07/04/2020

08/04/2020



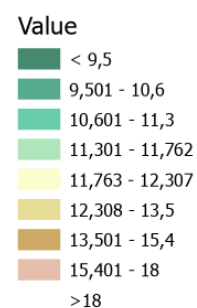
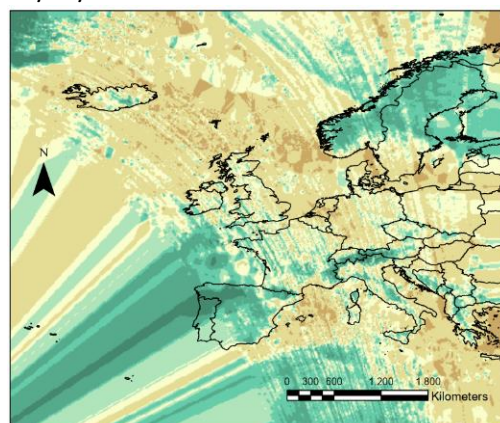
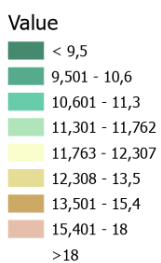
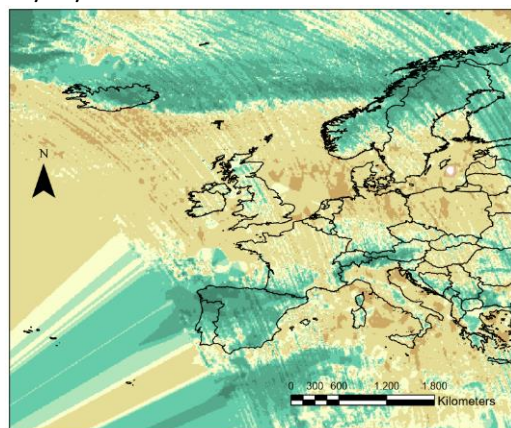
10/04/2020

29/04/2020



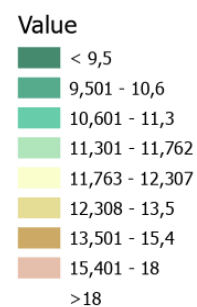
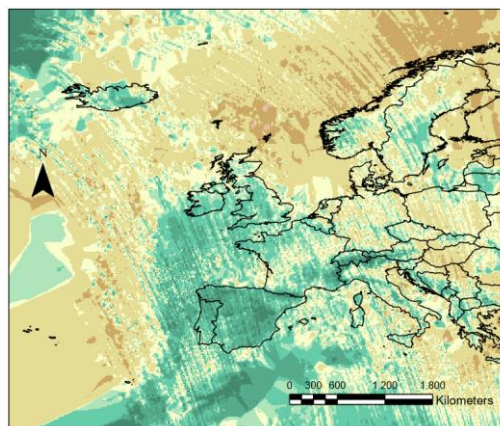
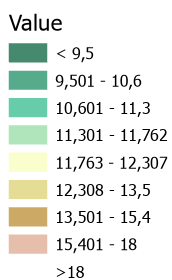
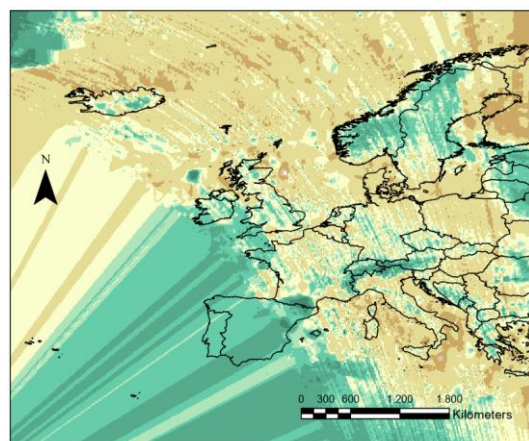
12/04/2020

14/04/2020

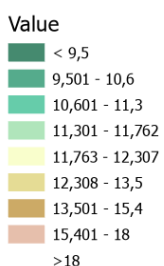
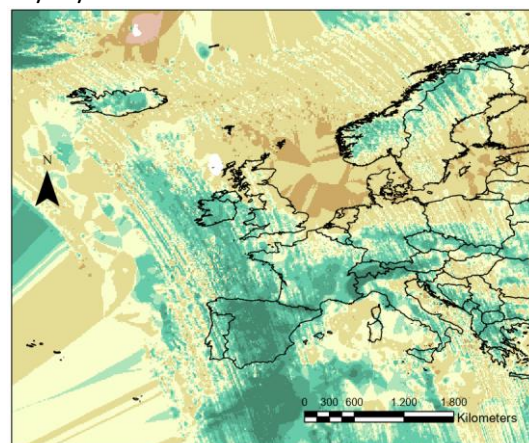


15/04/2020

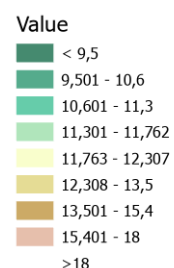
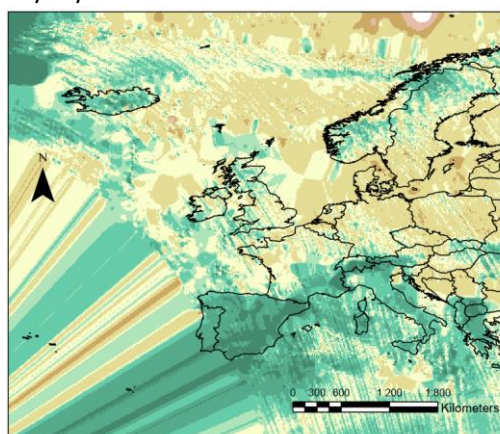
16/04/2020



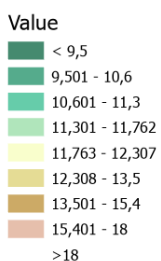
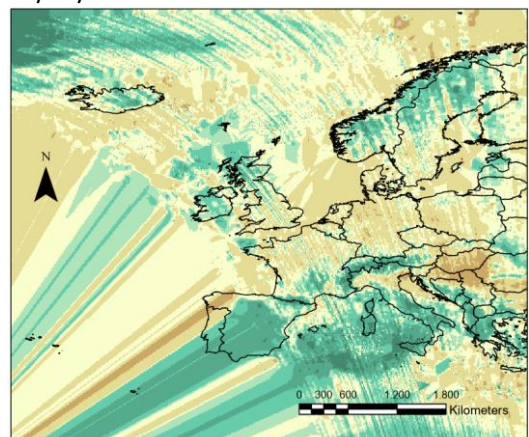
17/04/2020



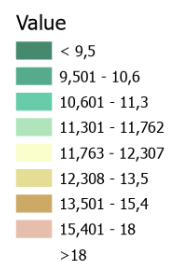
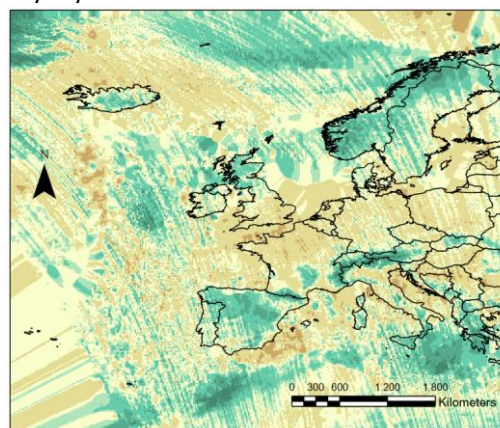
18/04/2020



19/04/2020

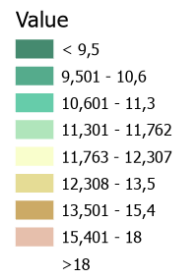
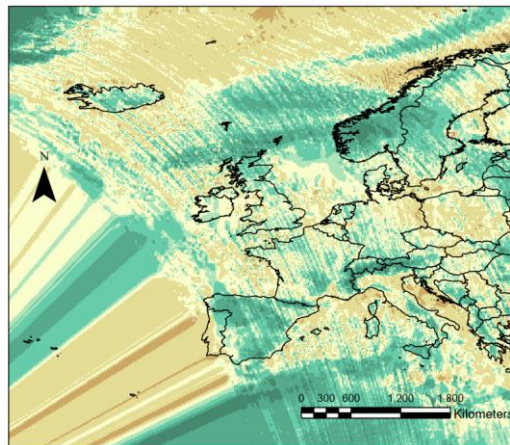
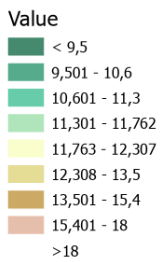
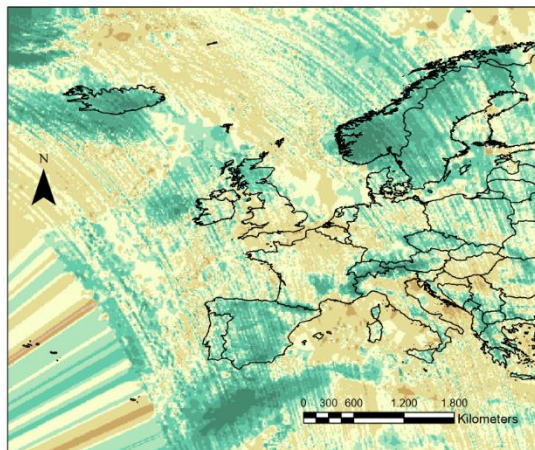


21/04/2020



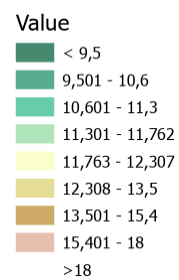
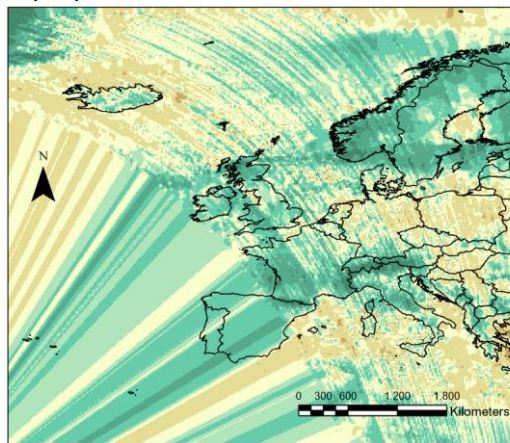
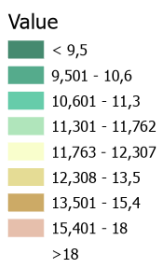
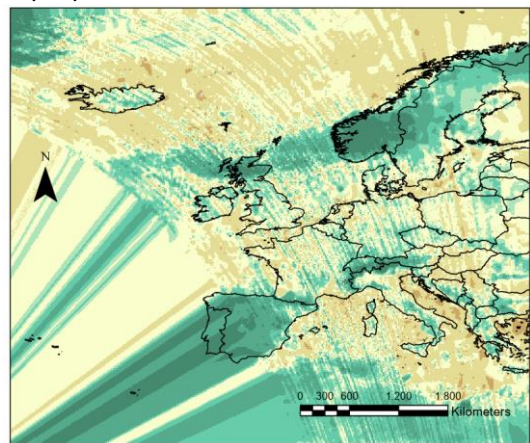
22/04/2020

23/04/2020



24/04/2020

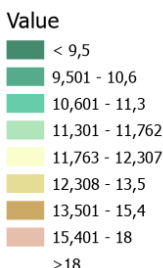
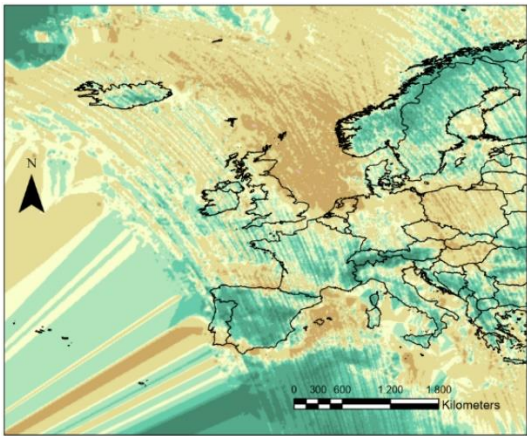
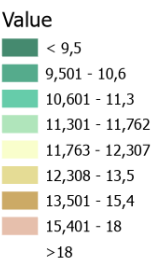
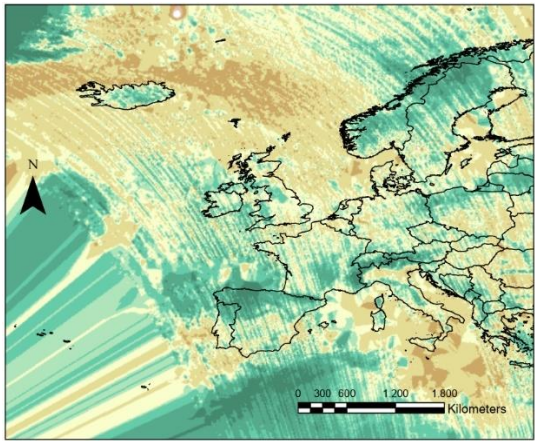
26/04/2020



27/04/2020

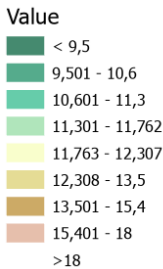
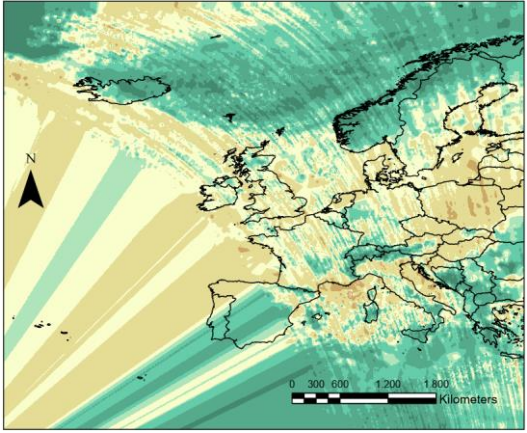
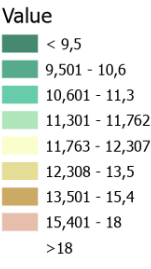
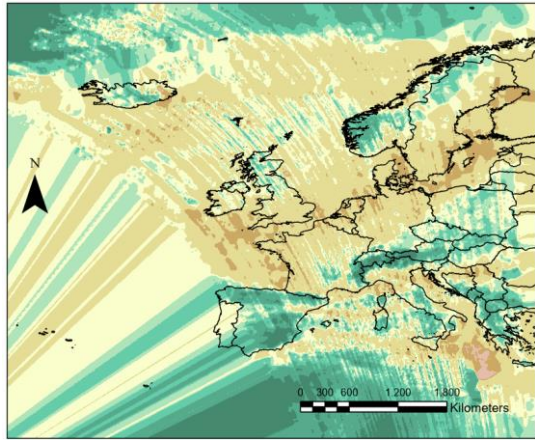
28/04/2020

Abril año 2021



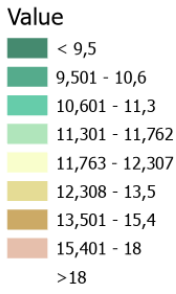
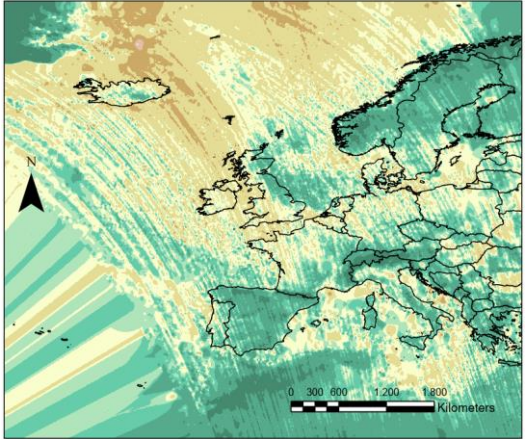
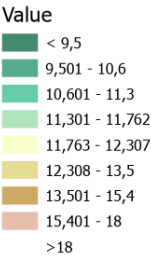
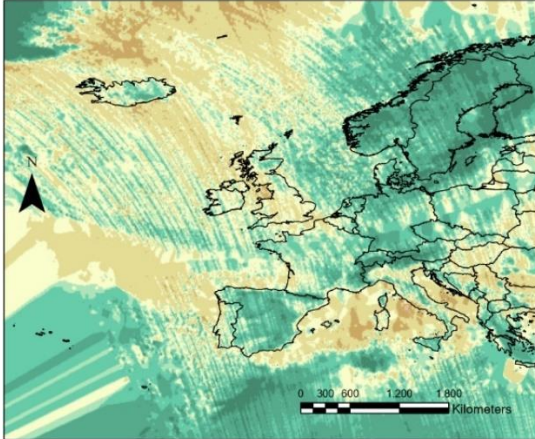
01/04/2021

02/04/2021



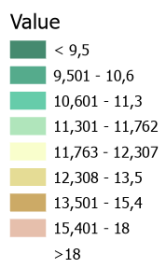
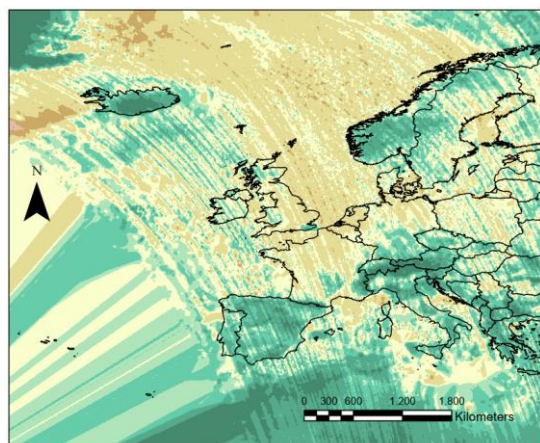
03/04/2021

04/04/2021

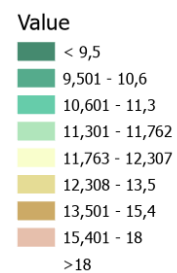
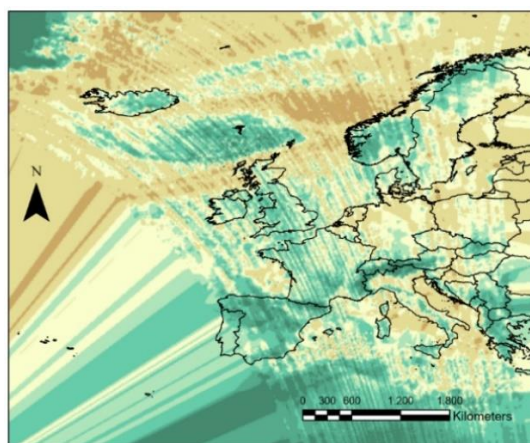


05/04/2021

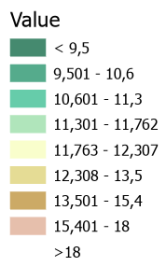
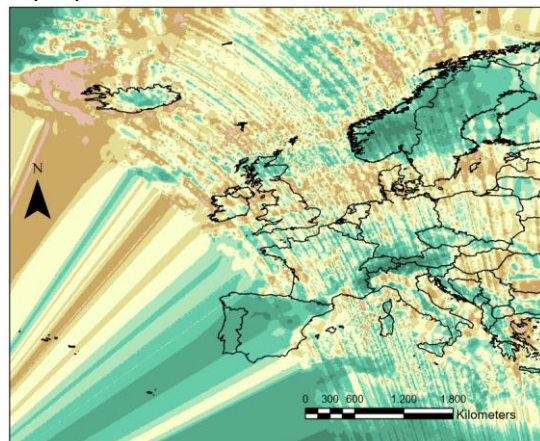
06/04/2021



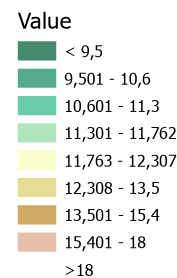
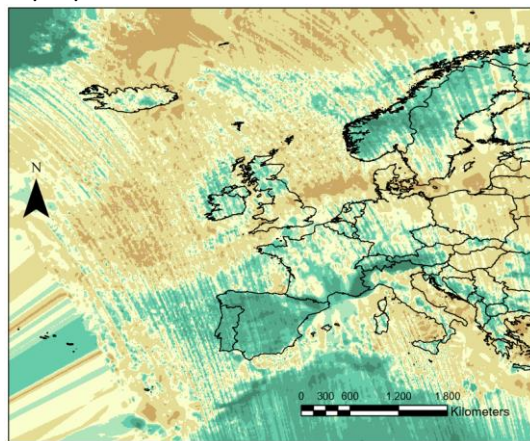
07/04/2021



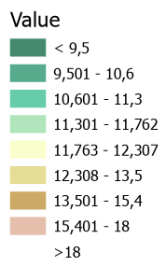
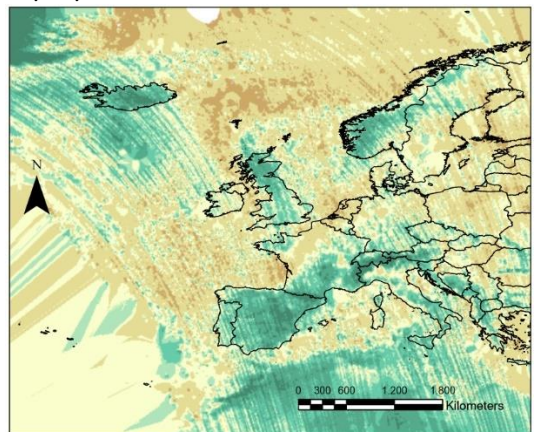
08/04/2021



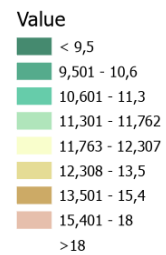
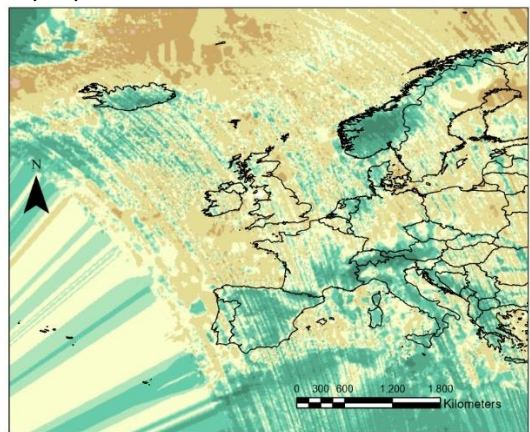
09/04/2021



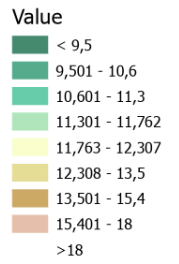
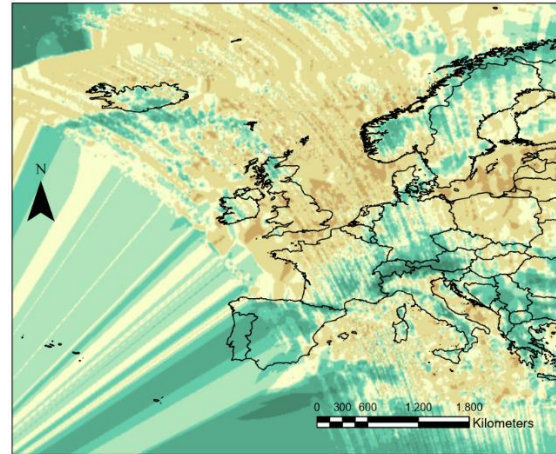
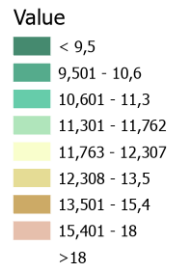
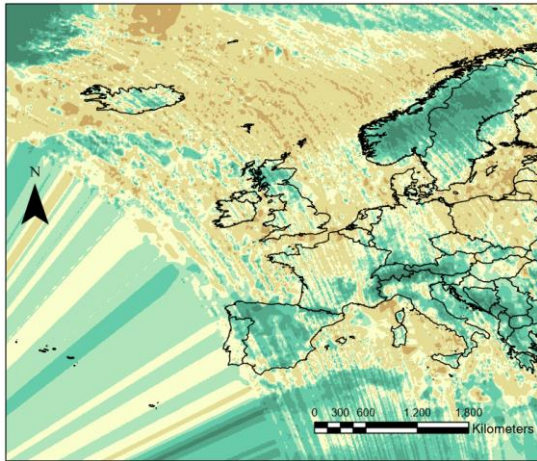
10/04/2021



11/04/2021

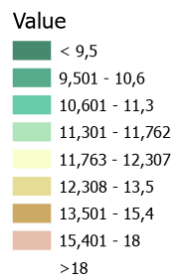
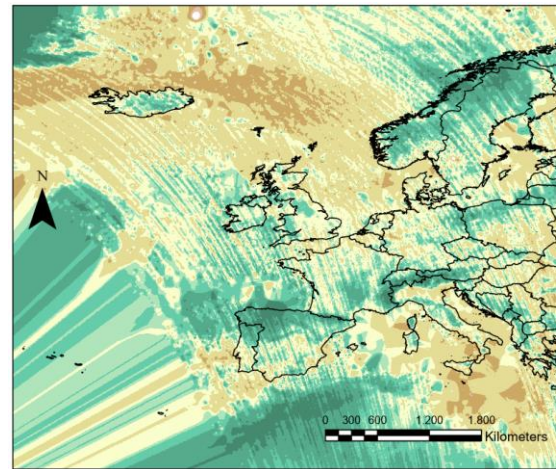
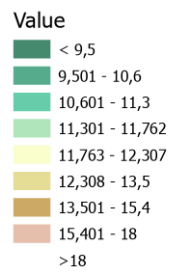
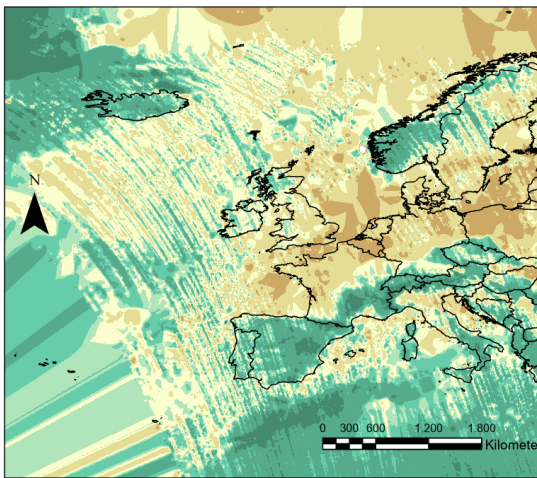


12/04/2021



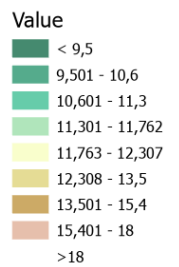
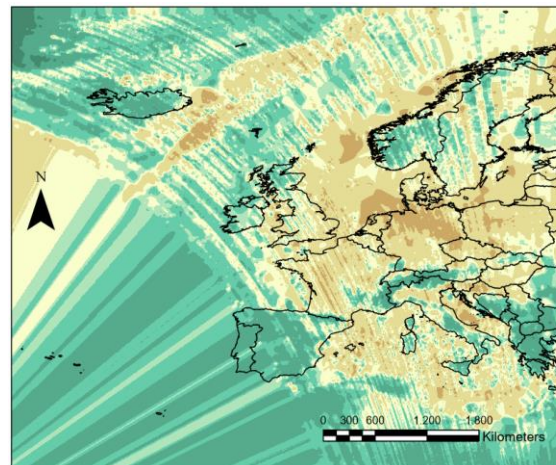
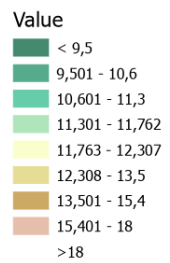
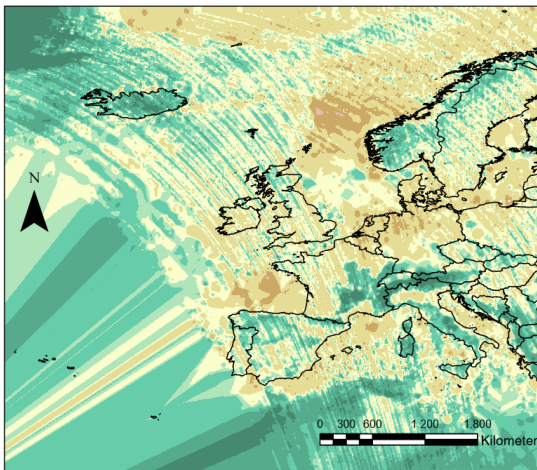
13/04/2021

14/04/2021



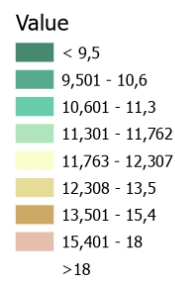
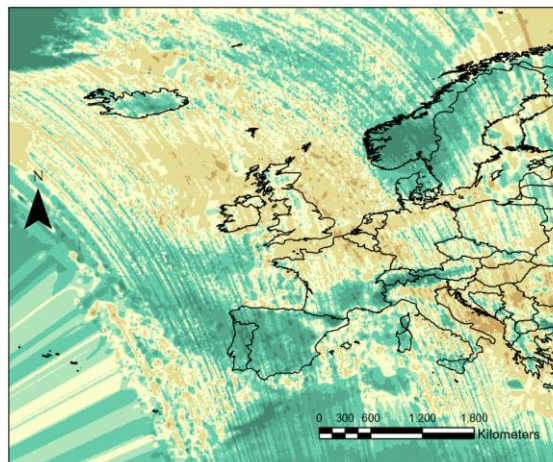
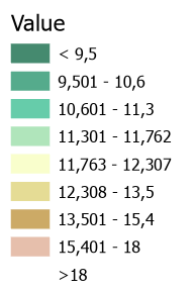
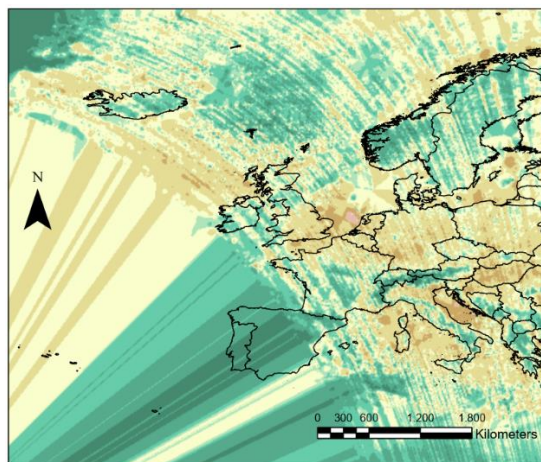
16/04/2021

17/04/2021



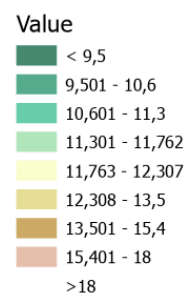
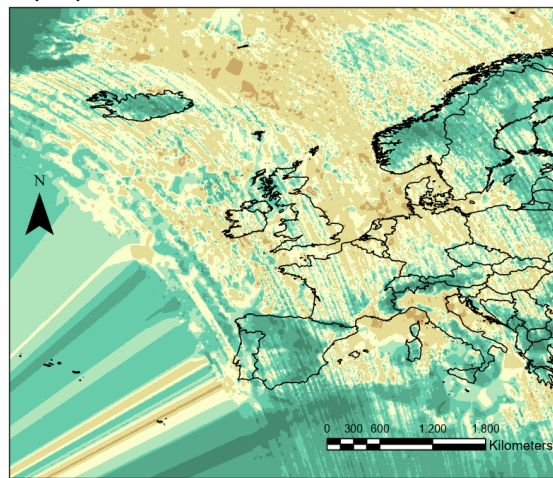
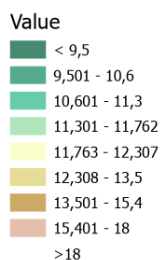
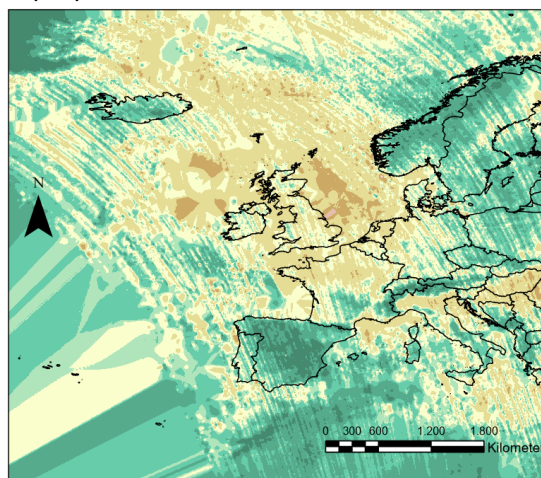
18/04/2021

19/04/2021



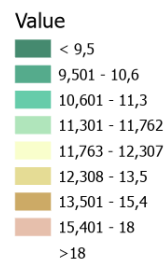
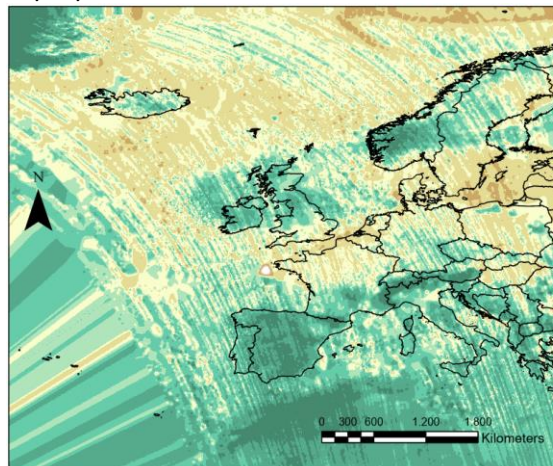
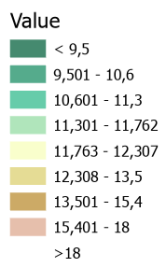
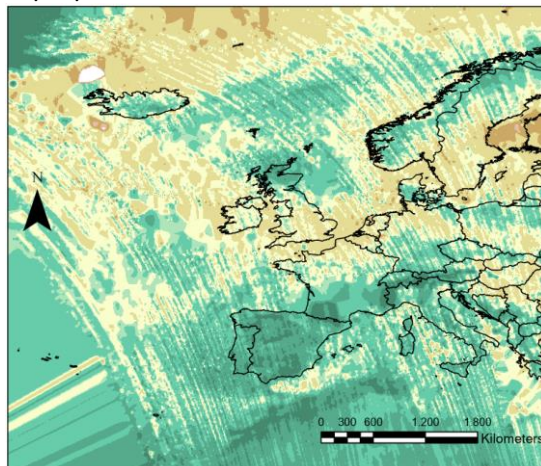
20/04/2021

21/04/2021



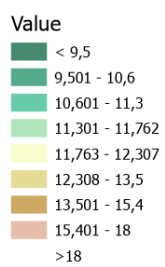
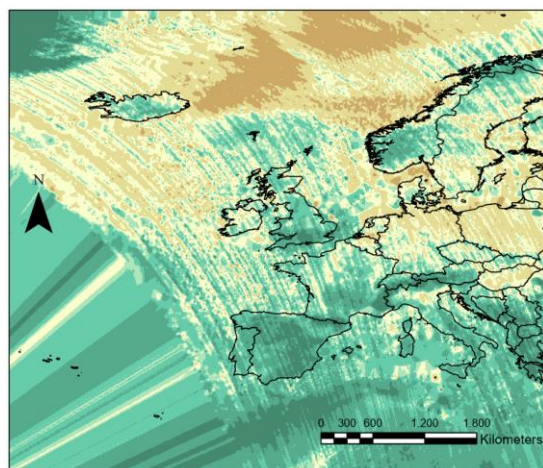
22/04/2021

23/04/2021

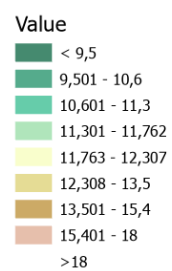
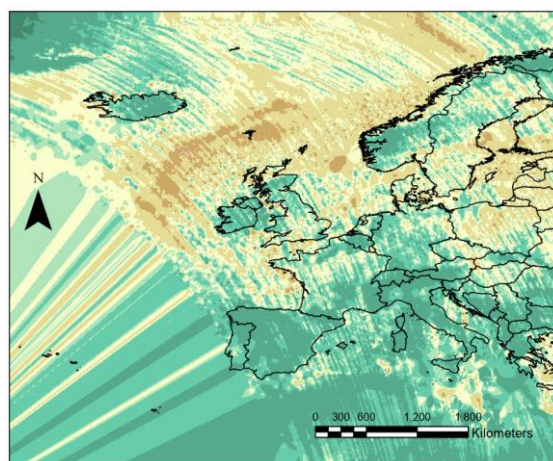


26/04/2021

27/04/2021



28/04/2021



29/04/2021