



Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

ANÁLISIS MIGRATORIO DE CONTAMINANTES EN EL NORTE DE ESPAÑA MEDIANTE EL USO DE DATOS FUNCIONALES

Autor: Enrique Albarrán Sánchez
Director: Manuel Alejandro Betancourt Odio

MADRID | Junio de 2022

RESUMEN

La contaminación es un problema latente en la actualidad, ya que tiene un impacto negativo en la salud de las personas y en la conservación del medioambiente. En los últimos años se han desarrollado planes con medidas medioambientales para frenar las emisiones de partículas contaminantes. Sin embargo, sigue habiendo mucho margen de mejora, especialmente en el ámbito de la actuación conjunta entre diferentes entidades. Partiendo de datos de contaminación recabados por la Agencia Española de Meteorología (AEMET) desde 2013 a 2020, se han analizado las correlaciones en los niveles de contaminación entre diferentes estaciones de medición de las Comunidades Autónomas de Cantabria y Galicia mediante el uso de datos funcionales. Se ha realizado un análisis de las correlaciones, para analizar el comportamiento migratorio de las partículas y por tanto detectar similitudes y diferencias en el comportamiento de los niveles de contaminación por O₃, PM₁₀ y PM_{2,5} entre estaciones de medición. Tras identificar las estaciones de medición con altas correlaciones (iguales o superiores a 0.71), el objetivo es establecer políticas medioambientales coordinadas entre las zonas en que se encuentran las estaciones con comportamientos similares. Se han identificado algunos factores con impacto en las correlaciones en los niveles de contaminación, como el viento, el tráfico y el clima.

PALABRAS CLAVE

Calidad del aire, O₃, PM₁₀, PM_{2,5}, Clima, Datos Funcionales

ABSTRACT

Pollution is a latent problem nowadays, as it has a negative impact on people's health and environmental conservation. In recent years, local, national, and international authorities have developed many action plans with environmental measures to curb emissions of polluting particles. However, there is still much room for improvement, especially in the field of joint action between different local, national, and international entities. Based on pollution data collected by the Agencia Española de Meteorología (AEMET) from 2013 to 2020, correlations in O_3 , PM_{10} and $PM_{2.5}$ pollution levels between different measurement stations in the Autonomous Communities of Cantabria and Galicia have been analyzed using functional data. An analysis of the correlations has been performed in order to analyze the migratory behavior of the mentioned polluting particles and, therefore, to detect both similarities and differences in the behavior of pollution levels between measurement stations. After identifying measurement stations with high correlations (equal to or over 0.71), the main goal is to develop coordinated environmental policies between specific areas where measurement stations with similar behavior regarding pollution levels are located. After performing the analysis, some key factors, such as wind, traffic, and weather, have been identified as meaningful factors affecting correlations in pollution levels.

KEYWORDS

Air quality, O_3 , PM_{10} , $PM_{2.5}$, Climate, Functional Data

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	7
CAPÍTULO I. ACTUALIDAD DEL TEMA.....	10
1. Naturaleza y efectos sobre la salud del O3, PM10 y PM2.5	10
2. Límites legales y valores recomendados para los niveles de contaminación	12
3. Régimen de los vientos	14
4. Análisis de las precipitaciones.....	19
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN A NIVEL LOCAL	22
1. Materiales y método.....	22
1.1 Fuente de datos y su tratamiento	22
1.2 Datos funcionales y el estadístico Tau de Kendall.....	24
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	28
1. Tratamiento y análisis exploratorio de las partículas contaminantes O3, PM10 y PM2,5	28
2. Análisis de los resultados del coeficiente funcional Tau de Kendall en las Comunidades Autónomas de Galicia y Cantabria	32
2.1 Análisis del estadístico Tau de Kendall para el O3.....	32
2.2 Análisis del estadístico Tau de Kendall para el PM10.....	41
2.3 Análisis del estadístico Tau de Kendall para el PM2,5.....	51
CONCLUSIONES.....	54
BIBLIOGRAFÍA.....	57
ANEXO	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Dirección e intensidad del viento en Santander	15
Figura 2 Dirección e intensidad del viento en Lugo	16
Figura 3 Dirección e intensidad del viento en Vigo	16
Figura 4 Dirección e intensidad del viento en Santiago de Compostela.....	17
Figura 5 Dirección e intensidad del viento en La Coruña	17
Figura 6 Dirección e intensidad del viento en Pontevedra	18
Figura 7 Dirección e intensidad del viento en Orense	19
Figura 8 Precipitación acumulada anual (mm) en Cantabria.....	20
Figura 9 Precipitación acumulada anual (mm) en Galicia.....	21
Figura 10 Niveles medios de O ₃ por tipo de zona	28
Figura 11 Niveles de contaminación horarios medios de O ₃ por tipo de zona	29
Figura 12 Niveles de contaminación medios de PM ₁₀ por tipo de zona	30
Figura 13 Niveles de contaminación horarios medios de PM ₁₀ por tipo de zona	30
Figura 14 Niveles medios de PM _{2,5} por tipo de zona.....	31
Figura 15 Niveles de contaminación horarios medios de PM _{2,5} por tipo de zona	32
Figura 16 Correlación en los niveles de O ₃ con los Tojos y geolocalización de las estaciones analizadas.....	32
Figura 17 Correlación en los niveles de O ₃ con los Campelo y geolocalización de las estaciones analizadas.....	34
Figura 18 Correlación en los niveles de O ₃ con Fraga Redonda y geolocalización de las estaciones analizadas.....	35
Figura 19 Correlación en los niveles de O ₃ con los Louseiras y geolocalización de las estaciones analizadas.....	36
Figura 20 Correlación en los niveles de O ₃ con Mourence y geolocalización de las estaciones analizadas.....	37
Figura 21 Correlación en los niveles de O ₃ con Noia y geolocalización de las estaciones analizadas	38
Figura 22 Correlación en los niveles de O ₃ con O Saviñao y geolocalización de las estaciones analizadas.....	39
Figura 23 Correlación en los niveles de O ₃ con San Vicente de Vigo y geolocalización de las estaciones analizadas	40
Figura 24 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con los Tojos y geolocalización de las estaciones analizadas.....	41
Figura 25 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con Areiro y geolocalización de las estaciones analizadas.....	42

Figura 26 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con Campelo y geolocalización de las estaciones analizadas.....	43
Figura 27 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con Dumbría y geolocalización de las estaciones analizadas.....	44
Figura 28 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con Fraga Redonda y geolocalización de las estaciones analizadas	45
Figura 29 Correlación en los niveles de PM ₁₀ Louseiras y geolocalización de las estaciones analizadas.....	46
Figura 30 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con Mourence y geolocalización de las estaciones analizadas.....	47
Figura 31 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con NNW y geolocalización de las estaciones analizadas.....	48
Figura 32 Correlación en los niveles de PM ₁₀ Paiosaco y geolocalización de las estaciones analizadas.....	49
Figura 33 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con Paraxón y geolocalización de las estaciones analizadas.....	50
Figura 34 Correlación en los niveles de PM ₁₀ con Presa de Villagudín y geolocalización de las estaciones analizadas	51
Figura 35 Correlación en los niveles de PM _{2,5} con Fraga Redonda y geolocalización de las estaciones analizadas	52
Figura 36 Correlación en los niveles de PM _{2,5} con San Vicente de Vigo y geolocalización de las estaciones analizadas	53

INTRODUCCIÓN

Cada año mueren en Europa más de 400.000 personas por efecto indirecto de la contaminación atmosférica. En España, esta cifra asciende hasta 31.600 muertes aproximadamente, 23.000 causadas por PM_{2,5}, 6.800 por NO₂ y 1.800 por O₃ (Agencia Europea del Medio Ambiente [AEMA], 2020). La contaminación atmosférica se define como la presencia en el aire de partículas o energía que puedan causar algún mal a la salud física de las personas o a la naturaleza (Aránguez, et al, 1999). A lo largo de la historia, la contaminación atmosférica ha sido un fenómeno natural, causado por incendios, liberación de gases en erupciones volcánicas, etc. Sin embargo, en los últimos siglos, desde la revolución industrial, la contaminación atmosférica por causas no naturales se ha incrementado fuertemente. (Aránguez, et al, 1999), hasta tal punto que la Organización Mundial de la Salud la ha calificado en múltiples ocasiones como uno de los mayores riesgos para la salud (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2002).

Los niveles de contaminación están descendiendo en los últimos años, gracias a la aplicación de políticas medioambientales que están resultando eficaces. En Europa, desde 1990 se ha reducido el número de muertes prematuras causadas por PM_{2,5} en un 60%, y se prevé, si se implementan efectivamente las políticas acordadas, que se reduzcan en un 54% para 2030 (AEMA, 2020).

Para poder desarrollar políticas medioambientales efectivas, primero hay que conocer cuáles son las circunstancias actuales en lo referente a la contaminación atmosférica. Actualmente hay más de 600 estaciones de medición fijas en España, con cerca de 4.000 analizadores y sensores que miden los niveles de contaminación en el aire. Se realizan mediciones horarias y diarias de contaminantes como el O₃, el PM₁₀, o el PM_{2,5}, entre otros, por lo que la información disponible es muy completa. Los niveles de contaminación registrados por las estaciones de medición se ven afectados por diversos factores, como puede ser el tráfico del entorno, la actividad industrial, la presencia de vientos o las características topográficas del entorno, entre otros.

La hipótesis de la que se parte en este trabajo es que la realización de un análisis a nivel local utilizando una técnica novedosa va a permitir poder establecer políticas de reducción de nivel de contaminación más eficientes, considerando patrones similares de comportamiento de la contaminación

Para el análisis de las correlaciones de parte de varias hipótesis adicionales:

- La proximidad entre zonas geográficas es determinante para la similitud entre los niveles de contaminación.
- Los vientos tienen un impacto significativo en las similitudes entre los niveles de contaminación.
- El comportamiento de los niveles de contaminación en zonas rurales está impactado por la contaminación producida en zonas urbanas o suburbanas.

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento migratorio de las partículas O_3 , PM_{10} y $PM_{2,5}$ entre zonas geográficas en el norte de España, concretamente en Galicia y Cantabria, mediante el uso de estadísticos y de datos funcionales, de manera que sea posible establecer políticas medio ambientales más eficaces.

Para el logro de este objetivo se aplicarán técnicas estadísticas sobre datos funcionales como es el caso de extensión de la Tau de Kendall para datos funcionales (Valencia et al., 2019) desarrollada para estos tipos de datos, y así obtener las correlaciones en los niveles de O_3 , PM_{10} y $PM_{2,5}$ entre las distintas estaciones de medición de Galicia y Cantabria.

Este trabajo se ha articulado en tres capítulos, además de esta introducción en la que se expone la novedad del tema, el objeto de la investigación, sus objetivos y las hipótesis de trabajo, y una conclusión.

En el primer capítulo se dedica un epígrafe a estudiar la importancia del tema que se aborda, explicando la naturaleza y efectos sobre la salud de los contaminantes analizados. Para poner de manifiesto la relevancia de establecer políticas medioambientales eficaces, se expone lo que dicta la ley sobre los valores límite de nivel de contaminación, así como las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud. Por último, un análisis exhaustivo de los vientos permitirá, como una de las variables que aporta información en el comportamiento de la contaminación, justificar las similitudes y diferencias a nivel local del comportamiento de la calidad del aire.

En el segundo capítulo se explica la metodología empleada para el análisis, y lo que aporta a la literatura existente el empleo del estadístico Tau de Kendall Funcional para hallar las correlaciones. Se exponen también los datos empleados para llevar a cabo el análisis.

En el tercer capítulo se exponen los resultados de la metodología propuesta. Se incluye también una explicación detallada de las similitudes encontradas entre zonas

geográficas y un mapeo de las estaciones de medición analizadas. Se contrastan las hipótesis antes descritas y se identifican las zonas con comportamientos en los niveles de contaminación similares, para así conocer las zonas sobre las que se podrían aplicar políticas medioambientales comunes.

Por último, se exponen las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I. ACTUALIDAD DEL TEMA

1. Naturaleza y efectos sobre la salud del O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}

El ozono (O₃) es un gas formado por tres átomos de oxígeno, inoloro e incoloro. Hay dos tipos, el ozono estratosférico, formado por el efecto de la radiación solar, y el troposférico, formado por reacciones de sustancias emitidas por el tráfico, la actividad industrial y la vegetación, como los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO) y el metano (CH₄), debido a las altas temperaturas y a la luz solar (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Al ser necesaria la luz solar para la formación del ozono, los niveles suelen ser más altos durante el día y durante los meses de verano. Por el contrario, durante la noche, la reacción del ozono con otros compuestos hace que se destruya, disminuyendo sus niveles.

Generalmente, los niveles de O₃ suelen ser más elevados en las zonas rurales y en las zonas suburbanas. Esto tiene su explicación en el proceso de formación del O₃ mencionado anteriormente (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Las reacciones tardan en producirse, y, en consecuencia, los precursores que reaccionan para dar lugar al O₃ pueden ser transportados por el viento varios kilómetros de distancia. Por eso las reacciones que dan lugar al O₃ se pueden producir en zonas diferentes al lugar en el que se emitieron los precursores. Estas reacciones pueden causar potenciales problemas de contaminación en zonas rurales más alejadas de la ciudad. Al estar las zonas rurales más libres de otras sustancias en el aire, el O₃ no se destruye durante la noche en la misma medida que en las ciudades, causando que en zonas rurales la concentración de O₃ permanezca en niveles elevados durante la noche (Mantilla et al., 2008). Adicionalmente, los niveles de O₃ suelen ser menos elevados en zonas urbanas con mucho tráfico, debido a que éste se consume debido a la oxidación del NO producido debido al tráfico. En entornos rurales, los niveles de NO son menores al haber menor tráfico y es por ello por lo que el O₃ aguanta más en el aire sin que la oxidación del NO lo consuma (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.).

Puede resultar perjudicial para la salud y para el medioambiente cuando se encuentra en grandes concentraciones. Unos niveles elevados de O₃ pueden causar problemas respiratorios en seres humanos, tales como irritación o asma (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Adicionalmente, también es un gas que puede contaminar ecosistemas reduciendo la biodiversidad y reduciendo la absorción

de dióxido de carbono por los árboles y plantas. El O_3 también es el gas que produce el llamado efecto invernadero principalmente, contribuyendo al calentamiento global (Benavides Ballesteros, H. O., y León Aristizabal, G.E., 2007).

Las partículas en suspensión son partículas compuestas de una mezcla compleja de aerosoles y sólidos microscópicos (Madrid Salud, 2022). Su tamaño puede variar desde los 0,1 milímetros hasta incluso los 10 milímetros. Hay muchos tipos de partículas suspendidas, pero en este trabajo se va a analizar los niveles de contaminación del PM_{10} y del $PM_{2,5}$. Estos dos tipos de partículas en suspensión reciben su nombre por su tamaño, por lo que “la medición se referirá a PM_{10} o $PM_{2,5}$ si pasan a través de un orificio de entrada calibrado con un rendimiento de separación de 50% para un diámetro aerodinámico de 10 mm o 2.5 mm respectivamente” (Aránguez, 1999).

Estas dos partículas en suspensión son las que más se han tratado de reducir y controlar su emisión, al ser consideradas como las más nocivas para la salud humana. El efecto tan nocivo en la salud humana es debido al fácil acceso al sistema respiratorio humano (Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Dentro del PM_{10} y el $PM_{2,5}$, es este último el que resulta más nocivo para la salud humana, al depositarse en los alveolos, que es donde tiene lugar el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono dentro de los pulmones (National Cancer Institute, 2022).

El elemento clasificador de las partículas en suspensión suele ser el tamaño, al ser determinante para el impacto en la salud humana. Dependiendo del tamaño, su comportamiento en la atmósfera varía. Las partículas más ligeras son capaces de viajar durante más tiempo, al contrario que las partículas más gruesas, que suelen permanecer cerca de su lugar de emisión. Las partículas de PM_{10} pueden formarse tanto por actividades industriales, agrícolas, etc., como por sucesos naturales como incendios o actividad volcánica, mientras que las partículas $PM_{2,5}$ se forman debido a la presencia de un gas precursor que suele estar ocasionado por procesos químicos (Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s.f.). Sin embargo, según el Inventario Nacional de Emisiones Contaminantes a la Atmósfera, la principal fuente de PM_{10} y $PM_{2,5}$ es la combustión en sectores no industriales, por delante del tráfico, segunda fuente de PM_{10} , y de la actividad agraria, segunda fuente de $PM_{2,5}$.

Al contrario que el O_3 , este tipo de partículas no se asocian a unas zonas en concreto (zonas rurales en el caso del O_3), registrándose valores relativamente altos de PM_{10} y $PM_{2,5}$ en áreas de índole muy diversa, como ciudades, zonas industriales o incluso

entornos rurales. Las partículas en suspensión pueden formarse por causas muy diversas, tales como el tráfico rodado, la minería, industria, el polvo procedente de África o incluso algunas actividades domésticas.

El polvo procedente de África hace que los niveles de contaminación por las partículas en suspensión se incrementen significativamente en determinados momentos, por lo que existe un procedimiento en la legislación (Real Decreto 102/2011 y Directiva 2008/50/CE) para analizar el impacto de las fuentes naturales como el polvo africano en los niveles de contaminación, y no contabilizarlo a efectos de cumplimiento de los límites legales. Sin embargo, el polvo procedente de África no tiene un impacto significativo en este trabajo de investigación, ya que tiene mayor impacto en los niveles de contaminación en el sur de España.

2. Límites legales y valores recomendados para los niveles de contaminación

La legislación establece límites anuales, diarios y octohorarios para la protección de la salud humana. Estos límites se fijan respecto de la media de los valores recogidos por las estaciones de medición. De acuerdo con el Portal Web de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid, los valores límites son “niveles fijados con arreglo a los conocimientos científicos con el fin de evitar, prevenir o reducir los efectos nocivos para la salud humana y el medio ambiente, que deben alcanzarse en un periodo determinado y no superarse una vez alcanzado”.

Según la legislación vigente (Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de calidad del aire), para el O₃, el límite es 120 µg/m³ tomando como periodo de referencia la máxima diaria de las medias móviles octohorarias. Este límite no puede superarse en más de 5 ocasiones de promedio por cada tres años. Adicionalmente, hay establecidos dos umbrales, de información y de alerta, que toman como parámetro el promedio horario. Según el Portal Web de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid, el umbral de información es “la concentración de contaminante a partir de la cual una exposición de breve duración supone un riesgo para la salud de los sectores especialmente vulnerables de la población”, mientras que el de alerta es “el nivel de concentración de un contaminante a partir del cual una exposición de breve duración supone un riesgo para la salud humana que afecta al conjunto de la población”. Para el O₃, el umbral de información es de 180 µg/m³, mientras que el umbral de alerta es de 240 µg/m³.

El RD 102/2011 establece un límite diario de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el PM_{10} , que no podrá superarse en más de 35 ocasiones por año. También establece un límite anual de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

El RD 102/2011 establece para el $\text{PM}_{2,5}$ solamente un límite anual, que es progresivo. Consta de dos fases. La fase I, con fecha de cumplimiento el 1 de enero de 2015, establece un valor límite anual de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la fase II, con fecha de cumplimiento el 1 de enero de 2020, establece un valor límite anual de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Abajo, se puede observar una tabla a modo de resumen.

Compuesto	Valor límite / Umbral	Concentración	Número máximo de superaciones
O_3	Máxima diaria de las medias móviles octohorarias	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 días al año en promedio por cada 3 años
	Umbral de información. Media horaria	180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
	Umbral de alerta. Media horaria	240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
PM_{10}	Media anual	40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	35 días al año
	Media diaria	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	
$\text{PM}_{2,5}$	Media anual	20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	

Fuente: RD 102/2011, relativo a la mejora de la calidad del aire

Por otro lado, la Organización Mundial de la Salud estableció unas recomendaciones sobre la contaminación en unas directrices revisadas en 2021. En ellas, establece como valor recomendado para el O_3 una media octohoraria de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para el PM_{10} una media anual de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una media diaria de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y para el $\text{PM}_{2,5}$ una media anual de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una media diaria de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Las recomendaciones establecidas por la Organización Mundial de la Salud evidencian que la legislación española no es lo suficientemente estricta. No protege completamente contra todos los efectos negativos de estos contaminantes sobre la salud humana y sobre el medio ambiente, por lo que este trabajo toma una mayor importancia. Mediante la identificación de zonas con comportamientos de los niveles de contaminación correlacionados, y la posterior implementación de políticas medioambientales comunes, se puede ayudar a proteger la salud de los habitantes y el medio ambiente de una manera más eficaz.

3. Régimen de los vientos

El régimen de los vientos tiene un impacto relevante en los niveles de contaminación. Muchas de las partículas contaminantes tienen un carácter migratorio, por lo que se desplazan a un lugar u otro en función de la dirección e intensidad del viento. El viento puede ser la causa de que los niveles de contaminación en dos estaciones sean similares. Es por ello por lo que resulta muy importante analizar el régimen de los vientos en las Comunidades Autónomas seleccionadas, y determinar el impacto que tiene en las correlaciones.

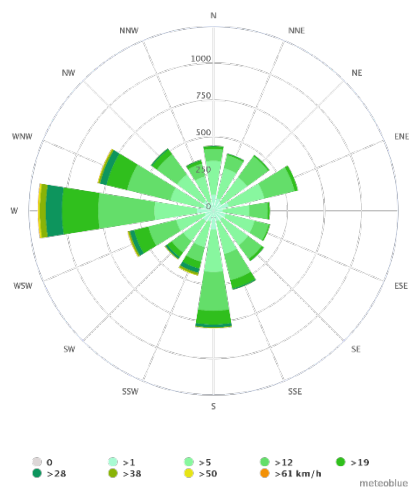
A continuación, se realizará una revisión del régimen de los vientos en las Comunidades Autónomas de Cantabria y Galicia, analizando los registros medios anuales de dirección y velocidad del viento para las principales ciudades de ambas Comunidades Autónomas. Para ello, se emplearán los datos y modelos climatológicos anuales elaborados por Meteoblue, cuyos datos proceden de su modelo meteorológico global NEMS, los cuales alcanzan una resolución de, aproximadamente, unos 30 km, y se construyen en base a observaciones recogidas en los últimos 30 años.

La rosa de los vientos es un elemento geométrico que representa los puntos cardinales, con mucho uso en la navegación y para señalar la dirección del viento. Está compuesta de 32 sectores, también llamadas rumbos. Tiene 4 divisiones principales con ángulos de 90° basados en los 4 puntos cardinales: norte (N), sur (S), este (E) y oeste (W). A su vez, existe una subdivisión, que parte cada punto cardinal a la mitad en un ángulo de 45° grados, encontrándose los siguientes rumbos o direcciones laterales: noreste (NE), sureste (SE), noroeste (NW) y suroeste (SW). Finalmente, hay una última subdivisión, que parte los sectores antes descritos a la mitad, en ángulos de 22,5°, formando los siguientes rumbos o direcciones colaterales: norte-noreste (NNE), sur-sureste (SSE), norte-noroeste (NNW), sur-suroeste (SSW), este-noreste (ENE), oeste-noroeste (WNW), este-sureste (WSW) y oeste-suroeste (WSW). Las siglas entre paréntesis, empleadas en este trabajo, derivan de las iniciales del nombre de los cuatro puntos cardinales en inglés: *north*, *south*, *east* y *west*. Se entiende que un viento “es de” una dirección (S, por ejemplo), cuando el viento viene desde esa dirección (cuando viene del sur).

En Santander (Figura 1), el viento que más prevalece es el de W, con un total de 1,181 h/año, seguido por el viento de WNW, con un total de 804 h/año. También tiene cierta importancia el viento de S, con 782 h/año. En cuanto a la intensidad, encontramos que el viento de W es el que sopla a una mayor velocidad, con hasta un 35% del tiempo

soplando a una velocidad superior a los 19 km/h. Para el viento de WNW se registra en torno a un 25% del tiempo velocidades superiores a 19 km/h, y el viento de S tan solo un 15% del tiempo. Por tanto, predominan los vientos provenientes del cuarto cuadrante (nótese que el primer cuadrante incluye el rango 0°-90°, desde el N hasta el E, el segundo cuadrante incluye el rango 90°-180°, desde el E hasta el S, el tercer cuadrante incluye el rango 180°-270°, desde el S hasta el W, y el cuarto cuadrante incluye el rango 270°-360°, desde el W hasta el N).

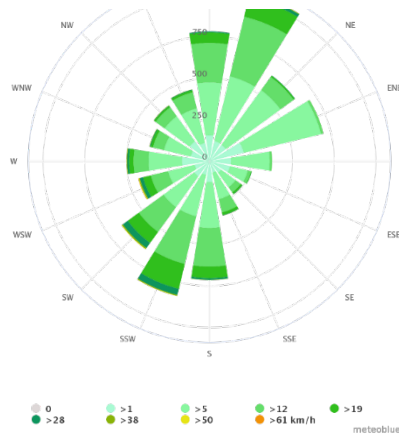
Figura 1 Dirección e intensidad del viento en Santander



Fuente: Meteoblue

En Lugo (Figura 2), el viento más común es el del NNE, con un total de 1,339 horas anuales de media soplando desde esa dirección, seguido del SSW (la dirección opuesta), con 900 h/año. Los vientos adyacentes al NNE, el viento del N (832 h/año) y del NE (745 h/año) también tienen cierta predominancia, así como los adyacentes al SSW, el SW (785 h/año) y el S (780 h/año). Cabe destacar que los vientos provenientes del SSW, SW y S soplan con más intensidad pese a soplar un menor número de horas al año, con hasta aproximadamente un 40% de las horas soplando a una velocidad mayor a 19n km/h. En el caso de los vientos provenientes del NNE, NE y N este porcentaje se reduce hasta aproximadamente un 8%.

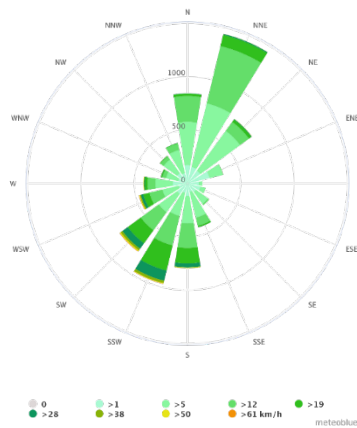
Figura 2 Dirección e intensidad del viento en Lugo



Fuente: Meteoblue

El régimen de los vientos de Vigo (Figura 3), es bastante parecido al de Lugo, predominando el viento de NNE y de SSW, con 1,033 y 833 h/año soplando desde esas direcciones. Nuevamente, el viento de SSW sopla más rápido, con 198 h/año con vientos superiores a 19 km/h, por 145 h/año de viento de NNE.

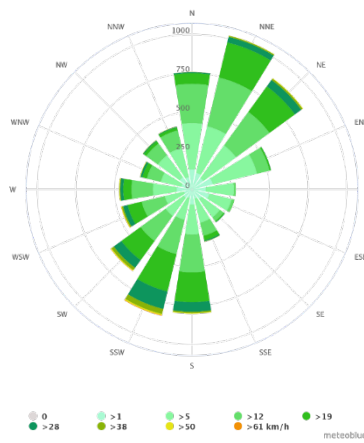
Figura 3 Dirección e intensidad del viento en Vigo



Fuente: Meteoblue

En cuanto a Santiago de Compostela (Figura 4), se puede observar un cambio en el patrón respecto a Vigo y Lugo. Sigue predominando el viento de NNE (1,017 h/año), pero, además, el segundo viento predominante es el de NE (886 h/año), por delante del de SSW (837 h/año) y del de S (792 h/año). De igual manera que en Lugo y Vigo, en Santiago de Compostela también sopla más fuerte el viento que viene desde el tercer cuadrante (S-W), que el que viene desde el primero (N-E).

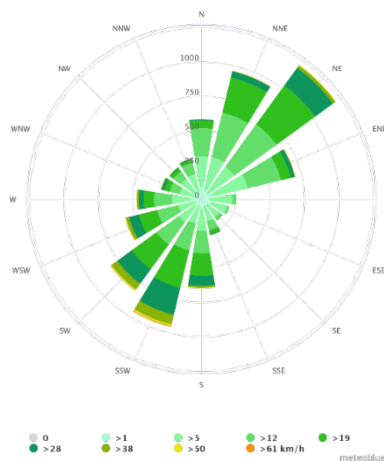
Figura 4 Dirección e intensidad del viento en Santiago de Compostela



Fuente: Meteoblue

En La Coruña (Figura 5), se observa que el régimen de los vientos es ligeramente diferente respecto a las ciudades ya mencionadas, predominando el viento del NE (1,210 h/año), seguido del viento del NNE (961 h/año). Nuevamente también tienen cierta importancia los vientos de la misma dirección, pero sentido opuesto. El viento del SSW (954 h/año) sopla prácticamente lo mismo que el de sentido opuesto, pero con un poco más de intensidad. Nuevamente el viento proveniente del tercer cuadrante registra velocidades medias superiores a los del primer cuadrante.

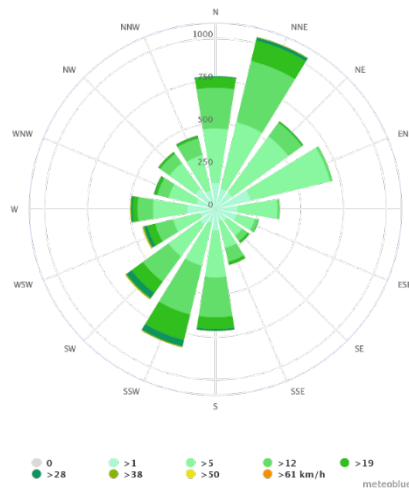
Figura 5 Dirección e intensidad del viento en La Coruña



Fuente: Meteoblue

En cuanto a Pontevedra (Figura 6), el régimen de los vientos es bastante similar al de Lugo y Vigo. Predomina el viento del NNE (1,033 h/año), seguido del de SSW (833 h/año). De igual manera, la intensidad es mayor en los vientos provenientes del tercer cuadrante.

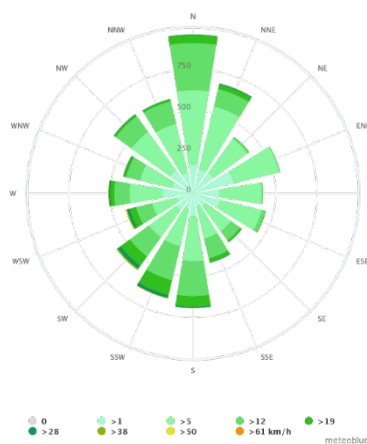
Figura 6 Dirección e intensidad del viento en Pontevedra



Fuente: Meteoblue

Por último, el comportamiento del viento en Orense (Figura 7) es menos homogéneo. La dirección del viento varía más que en las otras ciudades, y, por tanto, el número de horas de viento que sopla desde las direcciones que predominan es significativamente menor. En Ourense, el viento predominante es el del N (954 h/año), seguido del viento del S (680 h/año). Los vientos de dirección opuesta del NNE (679 h/año) y del SSW (653 h/año), soplan un número de horas muy similar. Ourense es la única ciudad de las analizadas en la que predominan vientos del NW sobre vientos del NE, los cuales registran un número de horas muy bajo comparado con el resto de ciudades. Finalmente, el cuadrante 3 vuelve a registrar un mayor número de horas de media con vientos superiores a 19 km/h que el cuadrante 1.

Figura 7 Dirección e intensidad del viento en Orense



Fuente: Meteoblue

Tras analizar los regímenes de vientos de estas seis ciudades en Galicia, se puede concluir que hay un claro predominio de los vientos del primer y del tercer cuadrante, registrando un número de horas anual significativamente superior al segundo y cuarto cuadrante. Entre los vientos provenientes del primer y tercer cuadrante, predominan los del primer cuadrante, especialmente los del NNE, con cierta predominancia también de los vientos del NE y del N. Como resulta lógico, los vientos de la misma dirección, pero sentido opuesto también tienen importancia, destacando dentro del tercer cuadrante una predominancia de viento del SSW (en muchas ocasiones incluso mayor a la del NE y a la del N).

Por otro lado, también se observa de forma notoria que los vientos provenientes del tercer cuadrante tienen una intensidad mayor a los del primero, registrando un mayor número de horas de media con vientos superiores a 19 km/h.

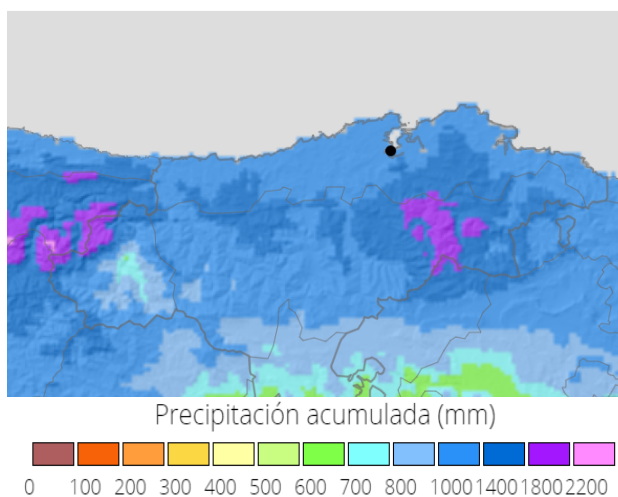
4. Análisis de las precipitaciones

Al igual que los vientos, las precipitaciones también tienen un impacto en los niveles de contaminación, ya que la lluvia disuelve y deposita en el suelo algunas partículas suspendidas en el aire (Ramos, 2018). Es por ello por lo que se suele asociar zonas más lluviosas a zonas menos contaminadas. Sin embargo, un exceso de contaminación puede dar lugar a lluvias ácidas, un fenómeno muy peligroso para la salud y el medioambiente. Por ello, se realizará un análisis de las precipitaciones en las dos Comunidades Autónomas analizadas, utilizando datos y mapas climáticos elaborados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Estos mapas los genera la AEMET

interpolando especialmente los datos recabados por las estaciones de la red de la AEMET desde 1981 hasta 2010.

El clima típico de Cantabria es oceánico, con temperaturas suaves (sin ser extremas en ningún momento del año) y mucha humedad. La zona más lluviosa es el este de la Comunidad, en el interior, justo por debajo de Santander (Figura 8). En esa zona se registran precipitaciones anuales acumuladas de entre 1,800 y 2,200 mm en las zonas más lluviosas, con precipitaciones anuales acumuladas de entre 1,400 y 1,800 mm en los alrededores, en otras zonas interiores más al oeste. Se observa que el litoral cantábrico no es la zona más lluviosa, aunque registra entre 1,000 y 1,400 mm de precipitaciones anuales acumuladas.

Figura 8 Precipitación acumulada anual (mm) en Cantabria

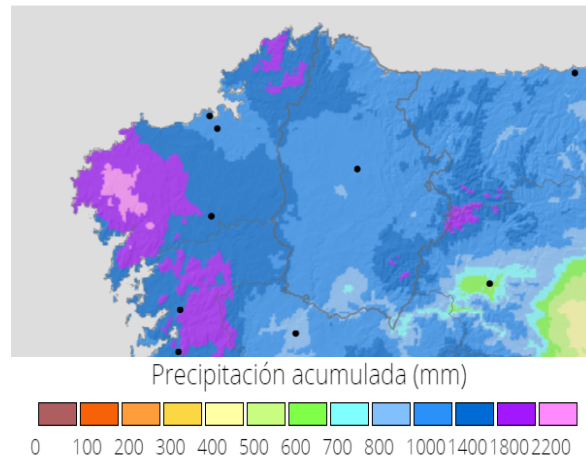


Fuente: AEMET

Galicia tiene un clima oceánico, aunque tiene zonas con un clima suboceánico, con temperaturas suaves y mucha humedad. En este caso, en general la zona más lluviosa se sitúa en el litoral (Figura 9). En el noroeste de Galicia se registran precipitaciones anuales acumuladas superiores a 2,200 mm. Una buena parte de la zona oeste de Galicia registra precipitaciones anuales acumuladas de entre 1,800 y 2,200 mm. También se registran estos valores en el norte, y en una pequeña región en el este de Galicia. Sin embargo, se puede apreciar como la tónica general es un descenso de las precipitaciones desde el oeste hacia el este, y desde el norte hacia el sur. También se puede apreciar como

Galicia es significativamente más lluviosa que Cantabria, por lo que probablemente tengan más impacto las precipitaciones en los niveles de contaminación.

Figura 9 Precipitación acumulada anual (mm) en Galicia



Fuente: AEMET

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN A NIVEL LOCAL

1. Materiales y método

1.1 Fuente de datos y su tratamiento

Se han recopilado datos horarios históricos proporcionados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico desde 2013 a 2020, para un total de 62 Estaciones de Medición, 51 en Galicia y 11 en Cantabria. Cada estación está asignada a un tipo de zona: rural, urbana o suburbana.

Se ha realizado un tratamiento de los datos proporcionados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, seleccionando las variables útiles para la realización del análisis, y completando ciertas variables no disponibles en los datos descargados mediante la integración con otros ficheros con la información faltante disponibles descargados directamente de la web del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico con alguna de las variables en común, que sirven como clave extranjera para realizar el *join*.

En el fichero utilizado como *input* para el código de R se dispone de las siguientes variables:

- COD EOI: Identificador único de la estación de medición
- NOM ESTACIO: Nombre de la estación de medición
- DATA: Fecha de la observación, en formato dd/mm/aaaa
- Magnitud: Código asociado a los diferentes contaminantes
- CONTAMINANTE: Nombre del contaminante sobre el que se ha realizado la observación
- UNIDAD: Unidad de medida de la observación ($\mu\text{g}/\text{m}^3$ en todos los casos)
- TIPO ESTACION: Tipo estación de medición: industrial, de fondo o de tráfico
- AREA: Zona en la que se encuentra la estación de medición: urbana, suburbana o rural
- COD INE: Identificador único del municipio de la estación de medición
- MUNICIPIO: Nombre del municipio de la estación de medición
- 01h, 02h, 03h... 24h: Valor de la observación en las diferentes horas del día. Cada hora del día representa una variable diferente en el documento

- LATITUD: Latitud de la estación de medición
- LONGITUD: Longitud de la estación de medición
- GEOREFERENCIA: Combinación en una sola variable de la latitud y longitud de la estación de medición

Cada línea del archivo representa las observaciones realizadas en un día (las horas del día se encuentran en columnas) por una estación para un contaminante.

En función del AREA, encontramos estaciones:

- Urbanas: ubicadas en zonas edificadas de forma continua
- Suburbanas: ubicadas en zonas mayormente edificadas, pero con separaciones por zonas no urbanizadas, como pequeños lagos, campos o bosques
- Rurales: ubicadas en zonas que no encajan en los criterios anteriores

Según el TIPO ESTACION, encontramos estaciones:

- De tráfico: estaciones próximas a una carretera, de tal forma que los niveles de contaminación se determinan principalmente por las emisiones producidas por el tráfico
- Industriales: estaciones cuyos niveles de contaminación están determinados por fuentes industriales principalmente
- De fondo: estación cuyos niveles de contaminación no están determinados predominantemente por ninguna fuente de emisión

Además, se ha creado un fichero secundario que contiene un resumen con la información de las estaciones, en el que se contiene la provincia, el nombre de la estación de medición, su localización (coordenadas geográficas), el tipo de estación, la altitud y otros valores,

Sobre la base de datos horarios (el archivo principal) se han construido funciones que describen anualmente el comportamiento de los niveles de contaminación para cada partícula estudiada en cada estación de medición. Sobre la propuesta de un estadístico soportado sobre datos funcionales, Tau de Kendall Funcional (explicado en mayor detalle en el siguiente epígrafe), se calculan las correlaciones entre estaciones de medición. Los

resultados obtenidos permiten determinar que zonas geográficas han tenido comportamientos similares en cuanto a los niveles de contaminación.

En la metodología se han aplicado técnicas de visualización espacial haciendo uso del sistema informático Tableau, mapeando las estaciones analizadas para cada estación rural, así como la propia estación rural, con el objetivo de analizar si existen correlaciones entre los citados efectos del entre zonas geográficas. Complementariamente, se han construido gráficos de radar en Excel con las correlaciones obtenidas para apoyar la explicación posterior de las correlaciones y complementar el mapeo en Tableau, permitiendo visualizar rápidamente las estaciones con mayor correlación y ubicarlas espacialmente en el mapa. Se ha realizado también un análisis de los niveles de contaminación en las distintas áreas de forma horaria, para ver si el comportamiento por horas es similar en media entre las distintas zonas, o si hay algún efecto que causa un desfase horario en el comportamiento, lo que podría explicarse con el régimen de los vientos.

Una vez calculadas las correlaciones, se han filtrado las estaciones rurales y se han analizado para encontrar explicación al comportamiento de los niveles de contaminación en las distintas áreas (urbanas, suburbanas y rurales). Para el análisis de las correlaciones se han tenido en cuenta las correlaciones mayores o iguales a 0 entre estaciones de medición, y se han seleccionado distintas estaciones urbanas y suburbanas para estudiar su correlación en los niveles de contaminación con las distintas estaciones rurales. En concreto, para el O_3 se han seleccionado las 3 estaciones con mayor correlación y las 3 con correlación más cercana a 0 para cada estación rural. Para el PM_{10} , al haber más estaciones que miden los niveles de este contaminante, se ha podido seleccionar las 4 con mayor correlación y las 4 con menor correlación. Para el $PM_{2,5}$ se han seleccionado las 3 estaciones urbanas o suburbanas con mayor correlación y las 3 con menor correlación.

1.2 Datos funcionales y el estadístico Tau de Kendall

El análisis de las correlaciones mediante el uso de datos funcionales contribuye a la literatura existente de varias maneras.

En primer lugar, existen diversos artículos que analizan los niveles de O_3 en diferentes zonas. En ellos, se estudia el impacto de diversos factores como la altitud, la localización geográfica, la estación del año o el tráfico en los niveles de contaminación

(Klein et al., 2017; Paloetti et al., 2014; Porter et al., 2014; Querol et al., 2018). En estos trabajos se evidencia que los niveles medios de O₃ en zonas rurales son superiores que en zonas urbanas (Paloetti et al., 2014), pero no existe literatura que profundice en el porqué de este fenómeno. Por ello, el estudio de las correlaciones en los niveles de contaminación entre estaciones de medición puede ayudar a encontrar una explicación y, por ende, a poner una solución al problema.

En segundo lugar, la detección de las fuentes principales de contaminación ayuda a prevenir las muertes, problemas de salud y daño medioambiental causado por ésta. El problema principal es que la información disponible no suele ser suficiente para evidenciar cuáles son estas fuentes principales, ya sea por falta de datos recopilados o por falta de longitudinalidad y precisión en la medición de los niveles de contaminación en una zona geográfica (Betancourt et al., 2021). En este trabajo se han identificado las correlaciones en los niveles de O₃, PM₁₀ y PM_{2,5} mediante el empleo del estadístico Tau de Kendall Funcional y utilizando más de 277.000 registros de contaminación recopilados durante 8 años en 51 estaciones de medición de Galicia y 11 de Cantabria. De esta manera, se pueden identificar los lugares con mayor nivel de contaminación y desarrollar políticas medioambientales para reducirlo.

En tercer lugar, al emplearse el estadístico Tau de Kendall Funcional para medir la correlación entre estaciones de medición se reconoce la naturaleza continua de la variable objeto de análisis. De esta forma, se evitan varias hipótesis simplificadoras impuestas por otros métodos cuantitativos, como la regresión multivariante, el análisis de componentes principales y el análisis de la varianza (Betancourt et al., 2021).

El estadístico Tau de Kendall Funcional es una extensión del Coeficiente Tau de Kendall tradicional (Kendall, 1955), y sirve para aplicar el estadístico para casos en los que los datos son curvas de funciones (Valencia et al, 2019). El estadístico clásico se basa en la idea de orden para medir la dependencia. Sin embargo, al no existir un orden entre funciones, la aplicación a datos funcionales del estadístico Tau de Kendall se basa en el uso de pre-órdenes que permiten ordenar las funciones y así medir la distinción entre pares de datos concordantes y discordantes encontrados en un conjunto de datos (Valencia et al, 2019). Se dice que dos variables son concordantes cuando observaciones grandes de una variable están relacionadas con observaciones grandes de la otra (lo mismo para observaciones pequeñas). Se dice que dos observaciones son discordantes cuando valores

grandes de una están relacionados con valores pequeños de la otra, y viceversa (Kendall, 1938).

Los pre-órdenes se definen matemáticamente de la siguiente manera (Betancourt et Al, 2021):

Sean f y g dos funciones continuas definidas en el intervalo compacto $I = [a,b]$, entonces:

$$f \preceq_m g \equiv \max_{t \in I} f(t) \leq \max_{t \in I} g(t) \quad (1)$$

$$f \preceq_i g \equiv \int_b^a (g(t) - f(t))dt \geq 0 \quad (2)$$

La primera condición (1) es conocida como máximo pre-orden, y sirve para ordenar funciones en base a su valor máximo. La segunda condición (2) se conoce con pre-orden integral, y sirve para ordenar funciones en base al área bajo la curva (Betancourt et al, 2021). Para el estudio de las correlaciones en los niveles de contaminación se ha utilizado la segunda opción.

La concordancia funcional se define de la siguiente manera: Sea \preceq un pre-orden entre funciones, y sea $<$ un pre-orden sin considerar los empates (se considera un empate cuando dos datos son iguales). Dos pares de funciones (f_1, g_1) y (f_2, g_2) son concordantes si $f_1 < f_2$ y $g_1 < g_2$ o $f_2 < f_1$ y $g_2 < g_1$; si no, son discordantes (Valencia et al, 2019).

Por último, el estadístico Tau de Kendall Funcional se define matemáticamente de la siguiente manera:

Si $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ son copias de un proceso estocástico bivalente, $\{(X(t), Y(t)) : t \in I\}$, la versión poblacional de esta medida de dependencia es

$$\tau = 2[P\{X_1 < X_2, Y_1 < Y_2\} + P\{X_2 < X_1, Y_2 < Y_1\}] - 1 \quad (3)$$

Considérese una muestra $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$ de un proceso aleatorio bidimensional $(X, Y) = \{(X(t), Y(t)) : t \in I\}$ dentro de intervalo compacto I , con $X, Y \in C(I)$. Entonces, el coeficiente de correlación de Kendall extendido se estima por la versión empírica:

$$\hat{\tau} = \binom{n}{2}^{-1} \sum_{i < j} [2I(x_i < x_j \text{ e } y_i < y_j) + 2I(x_j < x_i \text{ e } y_j < y_i)] - 1 \quad (4)$$

Para este trabajo, se ha calculado el estadístico Tau de Kendall Funcional mediante fórmulas de programación en MATLAB18b.

Al igual que ocurre con el coeficiente de correlación de Pearson, cuando el Tau de Kendall Funcional es igual a 1, se dice que hay una correlación positiva perfecta entre las dos funciones. Si, por el contrario, es igual a -1, se habla de una correlación negativa perfecta. Cuando el estadístico toma valor 0, se dice que no existe correlación entre las dos funciones. Como demostró Valencia en su estudio, este estadístico funcional es muy robusto, al no mostrar apenas sensibilidad a valores atípicos (Valencia et al, 2019). La robustez es muy importante a la hora de analizar datos de contaminación, al haber mucha dispersión en las observaciones dependiendo del tiempo y lugar específicos, lo que hace que los valores atípicos aparezcan con relativa frecuencia. Por tanto, se puede afirmar que los valores atípicos recogidos en la muestra apenas afectan a los resultados obtenidos para el estadístico Tau de Kendall Funcional (Betancourt et al, 2021).

La ventaja principal de utilizar esta novedosa técnica para hallar las correlaciones es que, al usar funciones de datos para caracterizar los niveles de contaminación diarios, no se pierde información útil para el estudio, lo cual habría sucedido si se utilizaran observaciones puntuales de variables aleatorias (Betancourt et al, 2021).

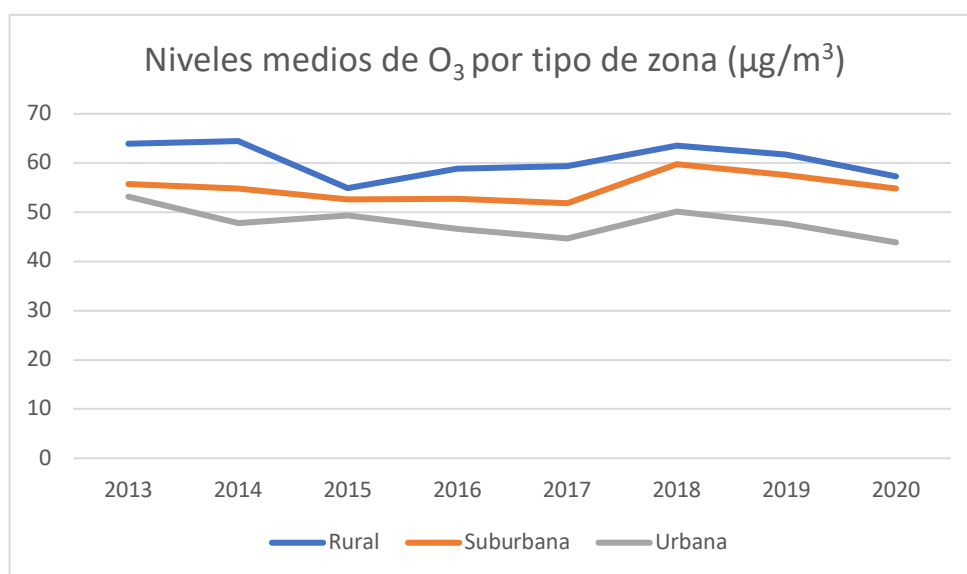
CAPÍTULO III. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

1. Tratamiento y análisis exploratorio de las partículas contaminantes O₃, PM₁₀ y PM_{2,5}

Una vez realizado el análisis por tipo de zona de los niveles de contaminación medios, se han obtenido los siguientes resultados:

En lo referente al O₃ (Figura 10), en general se aprecia un ligero descenso en los niveles de contaminación desde 2013 hasta 2017. En 2017 y 2018 se produjo un incremento de los niveles de contaminación medios. En 2019 y 2020 el nivel de contaminación por O₃ descendió respecto al 2018. Los niveles de O₃ suelen ser más elevados en zonas rurales, hipótesis que se cumple para las Estaciones de Medición analizadas. La media de todas las observaciones recopiladas de los niveles de O₃ es de 54.47 µg/m³, con un margen relativamente grande respecto a los límites legales y las recomendaciones de la OMS todos los años analizados. Se puede observar también que los niveles en estaciones de medición de zonas urbanas tienden a ser menores que en las zonas suburbanas.

Figura 10 Niveles medios de O₃ por tipo de zona

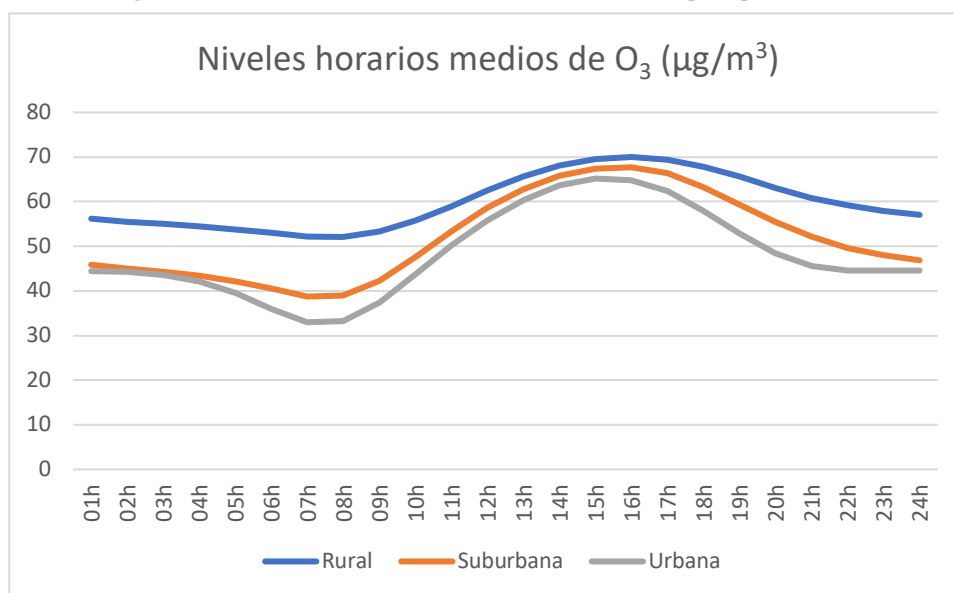


Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

El análisis horario de los niveles de O₃ (Figura 11) muestra como claramente los niveles de O₃ son superiores durante el día que durante la noche, con un máximo en torno a las 15:00-16:00 horas. Como se explicó con anterioridad, los niveles de contaminación por O₃ en las zonas rurales se mantienen más constantes durante las 24 horas del día, ya que, al haber menos partículas de otro tipo que al reaccionar con el O₃ lo destruyen, los

niveles no disminuyen tanto durante la noche, como sí ocurre en las zonas urbanas y suburbanas.

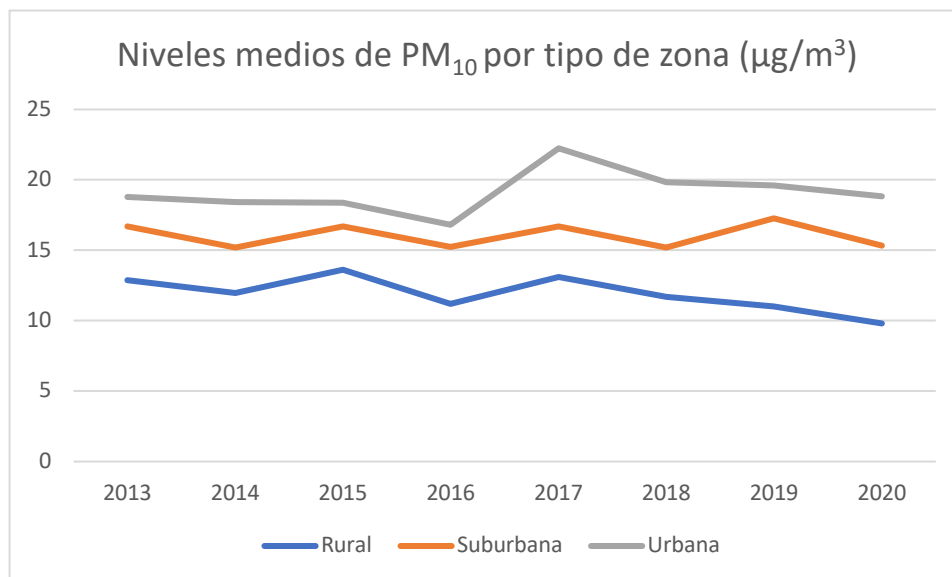
Figura 11 Niveles de contaminación horarios medios de O₃ por tipo de zona



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

En cuanto al PM₁₀ (Figura 12), se observan unos niveles de contaminación que permanecen en un rango acotado a lo largo de los años, salvo en las zonas urbanas, donde se produce un pico muy marcado en 2017, donde se incrementó el nivel de contaminación medio de 16.81 µg/m³ a 22.24 µg/m³, un incremento de más de un 32%. Se puede apreciar también el impacto del Covid-19 en los niveles de contaminación, sobre todo en zonas rurales, aunque de forma más suave que en el caso del O₃. Cabe destacar también que para el caso del PM₁₀ los niveles de contaminación medios son sustancialmente más elevados en zonas urbanas que en zonas rurales. El valor medio de las observaciones analizadas de PM₁₀ es de 15.69 µg/m³, valor que se sitúa dentro de los límites marcados por la legislación. Respecto a las recomendaciones de la OMS, los niveles medios en zonas urbanas en 2017 estaban por encima.

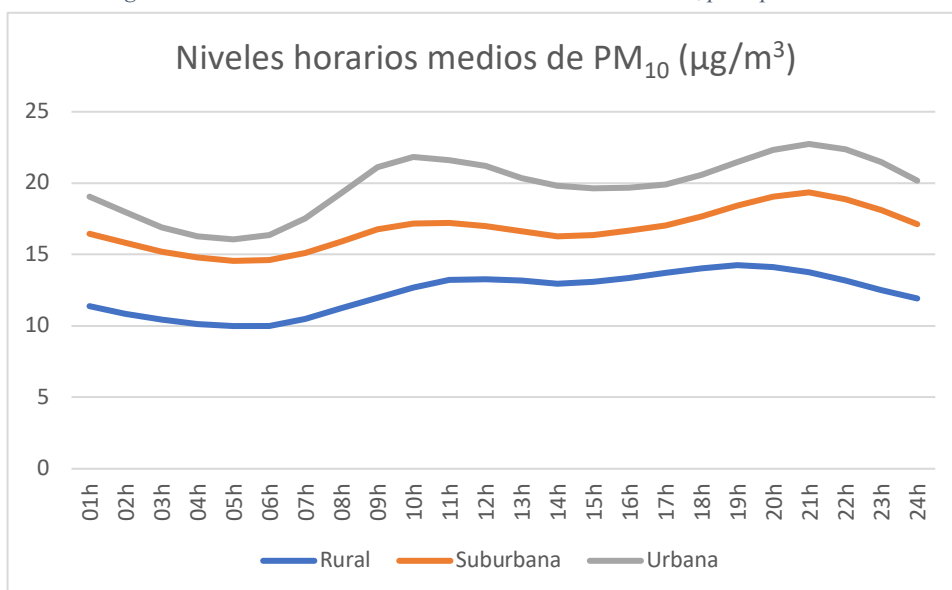
Figura 13 Niveles de contaminación medios de PM₁₀ por tipo de zona



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

El análisis de los niveles horarios medios de PM₁₀ (Figura 13) muestra que el comportamiento horario de los niveles de contaminación es bastante similar en los tres tipos de zonas. Hay dos momentos del día en los que se registran valores medios más elevados. Por la mañana, en torno a las 10:00 horas, se observa un máximo relativo y durante la noche, entre las 21:00 y 22:00 horas se observa un máximo absoluto. También se observa que los valores descienden durante la noche, de igual manera que ocurre con el O₃.

Figura 12 Niveles de contaminación horarios medios de PM₁₀ por tipo de zona

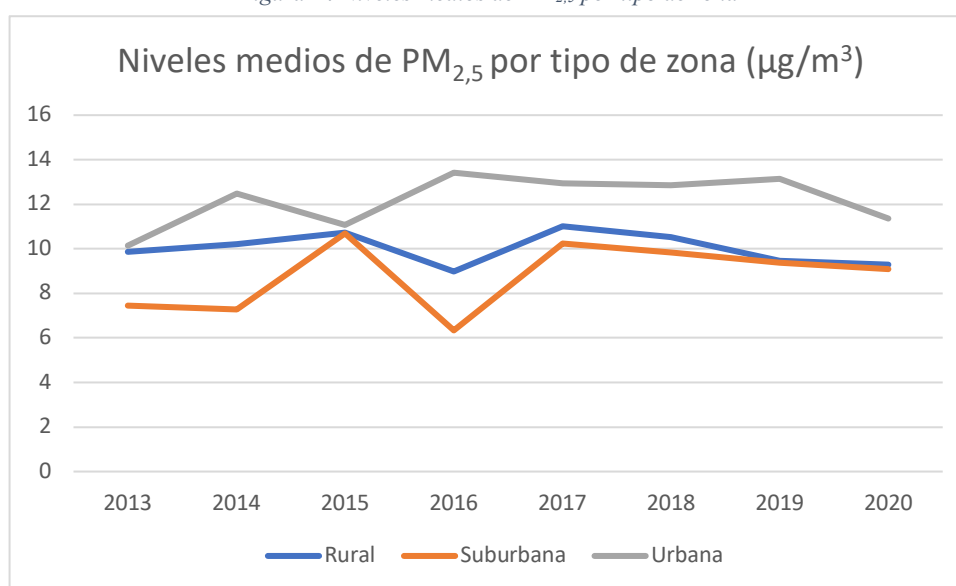


Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

En lo referente al $PM_{2,5}$ (Figura 14), los niveles de contaminación en zonas urbanas y rurales permanecieron relativamente estables en los años analizados. Sin embargo, en las zonas suburbanas producen diferencias notables en los niveles de contaminación de un año a otro (de $10.69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015 a $6.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2016, por ejemplo).

Nuevamente se vuelven a notar los efectos del Covid 19, especialmente en zonas urbanas, al contrario de lo que sucedía con el PM_{10} . Desde 2013 hasta 2017 (sin tener en cuenta 2015), los niveles en zonas rurales tendían a ser más elevados que en zonas suburbanas, aunque esta diferencia se está estrechando en los últimos años, hasta registrar valores medios muy similares en 2019 y 2020. La media de todas las observaciones recopiladas de los niveles de $PM_{2,5}$ es de $10.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un margen relativamente grande respecto a los límites legales todos los años analizados, pero por encima de las recomendaciones de contaminación anual de la OMS, especialmente para el caso de las zonas urbanas, donde los valores medios de todos los años son superiores al valor recomendado por la OMS.

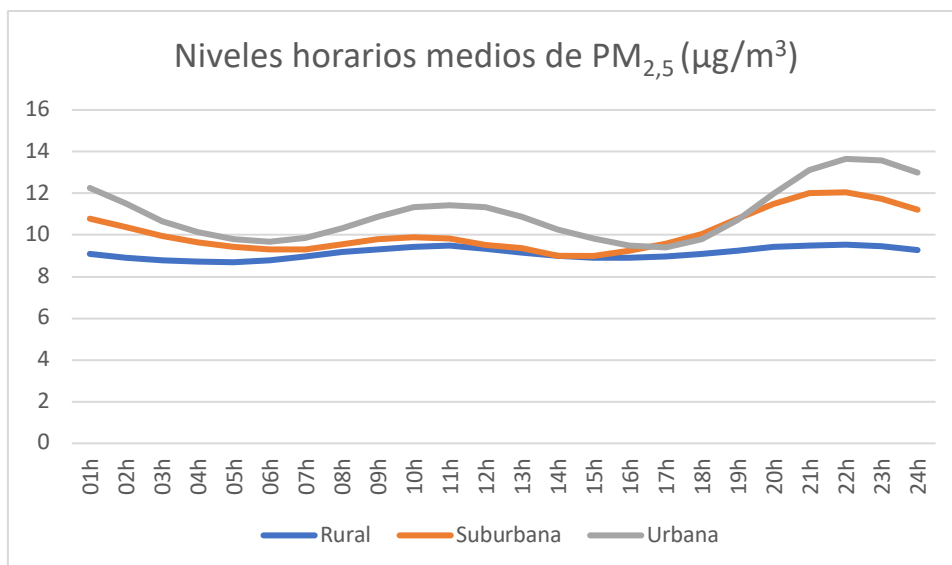
Figura 14 Niveles medios de $PM_{2,5}$ por tipo de zona



Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

El análisis horario (Figura 15) de la contaminación por $PM_{2,5}$ muestra que los niveles de contaminación son bastante constantes durante el día, especialmente en zonas rurales. Hay un máximo absoluto entre las 21:00 y 22:00 horas.

Figura 15 Niveles de contaminación horarios medios de PM_{2,5} por tipo de zona

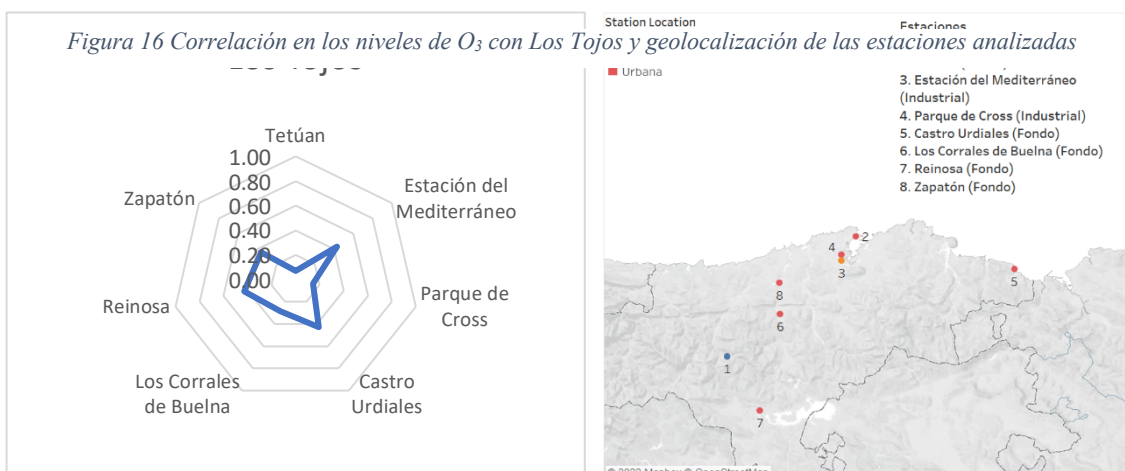


Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

2. Análisis de los resultados del coeficiente funcional Tau de Kendall en las Comunidades Autónomas de Galicia y Cantabria

2.1 Análisis del estadístico Tau de Kendall para el O₃

Los Tojos es una estación de medición de fondo, ubicada en el municipio de Los Tojos en Cantabria, en pleno parque nacional del Saja, en el valle del Cabuérniga. Se encuentra a una altitud de unos 650 m.s.n.m. El comportamiento de la contaminación en esta estación (Figura 16) presenta correlaciones no superiores a 0.43 con las estaciones urbanas y suburbanas analizadas, siendo las correlaciones más altas con la Estación del Mediterráneo, con Castro Urdiales y con Reinosa, todas 0.43. Por el contrario, presenta una correlación muy baja con Tetúan (0.07) y con Parque de Cross (0.14).



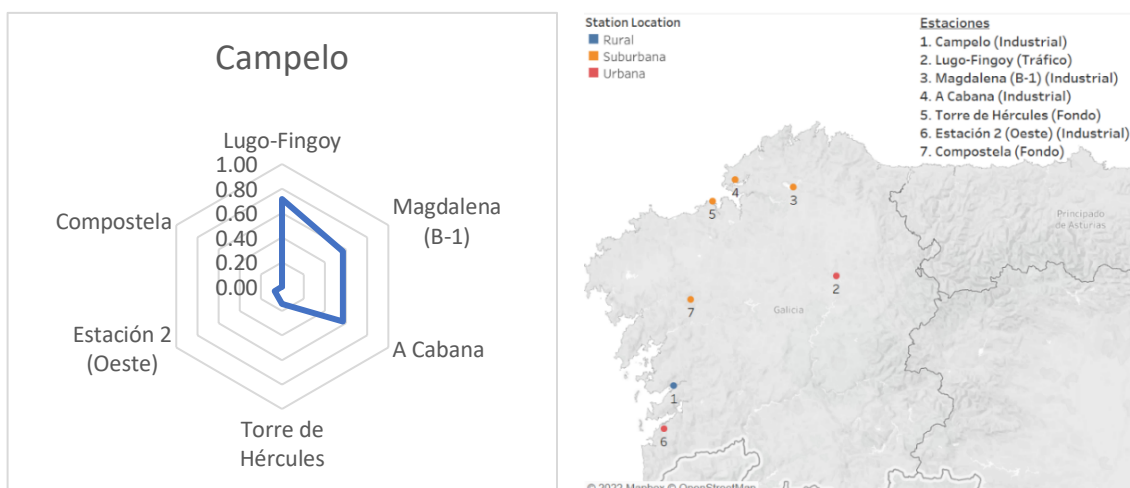
El hecho de que Los Tojos este ubicada en un enclave montañoso, cerca de los Picos de Europa, alejado de grandes núcleos urbanos (se encuentra a más de 60 km de Santander), hace que las correlaciones con el resto de las estaciones urbanas y suburbanas sean iguales o inferiores a 0.43.

Las partículas de O₃ tienden a formarse a grandes distancias de donde se emitieron sus precursores, debido a que son transportadas por el viento. Sin embargo, debido a que se encuentra situada en un valle, es más difícil que los vientos transporten las partículas contaminantes desde la ciudad hasta su ubicación, manteniendo los niveles de correlación entre esta estación y el resto bastante en los niveles descritos.

Hay una correlación de 0.29 entre Los Corrales de Buelna y Los Tojos, situadas a tan solo 20 km de distancia, lo que parece extraño. Una posible causa es el régimen de los vientos en Cantabria, además de la topografía del lugar. El viento predominante en Santander (y asumiendo que es parecido en toda la Comunidad Autónoma, al no ser demasiado grande), es el viento de W, seguido del de WNW. Esto hace que los vientos no transporten las partículas de O₃ que pueda haber en Los Corrales de Buelna hacia Los Tojos o viceversa, al encontrarse Los Tojos al SW de Los Corrales Buelna. En cuanto a las dos correlaciones más bajas (con Parque de Cross y con Tetúan), se explican por la topografía de la zona (un enclave entre montañas) y los vientos.

Campelo es una estación de medición de tipo industrial, ubicada en el municipio de Poio, en Pontevedra. Es una estación costera, situada a poco más de un kilómetro de la playa de Lourido, a una altitud de 20 m.s.n.m. En cuanto a los niveles de O₃ (Figura 17), presenta una correlación relativamente alta con la estación de Lugo-Fingoy (0.71), mientras que apenas presenta correlación con la Estación 2 (0.07) y con la estación de Compostela (0.00).

Figura 17 Correlación en los niveles de O₃ con los Campelo y geolocalización de las estaciones analizadas



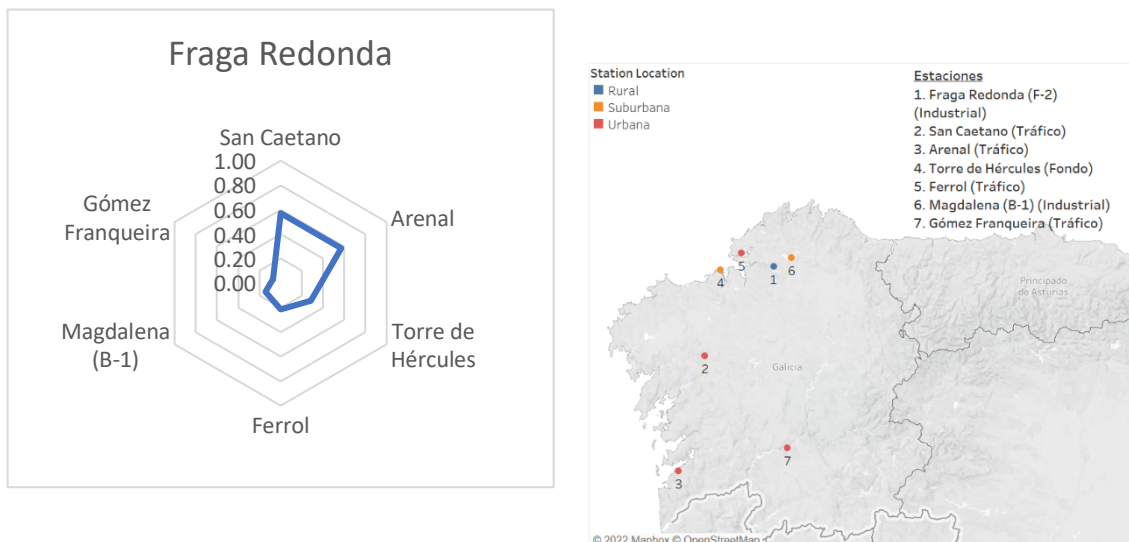
El comportamiento de los niveles de O₃ en Campelo muestra una correlación de 0.71 con la estación Lugo-Fingoy. Se tratará de buscar una explicación en el régimen de los vientos de Lugo. Campelo se encuentra al sureste de la estación de Lugo-Fingoy, por lo que, teniendo en cuenta el régimen de los vientos en Lugo, donde predomina el viento del NNE, parece razonable que las partículas de O₃ emitidas en una zona urbana como Lugo, se desplacen empujadas por el viento hacia una zona rural como Campelo.

Pese a estar situadas a tan solo 25.66 kilómetros de distancia, los niveles de O₃ registrados por las estaciones de Campelo y Estación 2 no muestran signos de correlación (0.00). La Estación 2 es una estación urbana que se encuentra situada en Vigo. Tomando en consideración estas observaciones, lo lógico sería que los niveles de O₃ en Campelo estuvieran algo correlacionados con los de Vigo, al encontrarse Campelo situado al noreste de Vigo. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 1, las estaciones de Lugo-Fingoy, Campelo y Estación 2 se sitúan en una línea bastante recta, trazada desde un Punto entre el noreste y el nor-noreste. Teniendo en cuenta que el viento sopla un mayor número de horas al año desde el NNE (aproximadamente un 49% en el caso de Lugo y un 24% en el caso de Vigo), se puede afirmar que el viento predominante en el suroeste de Galicia es el viento de NNE, lo que hace que los niveles de O₃ en Campelo estén muy correlacionados (0.71) con los de Lugo-Fingoy y prácticamente incorrelacionados con los de Estación 2 (0.07).

Fraga Redonda es una estación de medición industrial situada en el municipio de As Pontes de García Rodríguez, en la Coruña, a 478 m.s.n.m. El municipio es sede de una central térmica, la mayor planta de carbón en España, convirtiendo este municipio en un

gran núcleo industrial en Galicia. Muestra una correlación los niveles de O_3 (Figura 18) con las estaciones de San Caetano y de Arenal de 0.57. Por el contrario, muestra una correlación con la estación de Gómez Franqueira de 0.07.

Figura 18 Correlación en los niveles de O_3 con Fraga Redonda y geolocalización de las estaciones analizadas



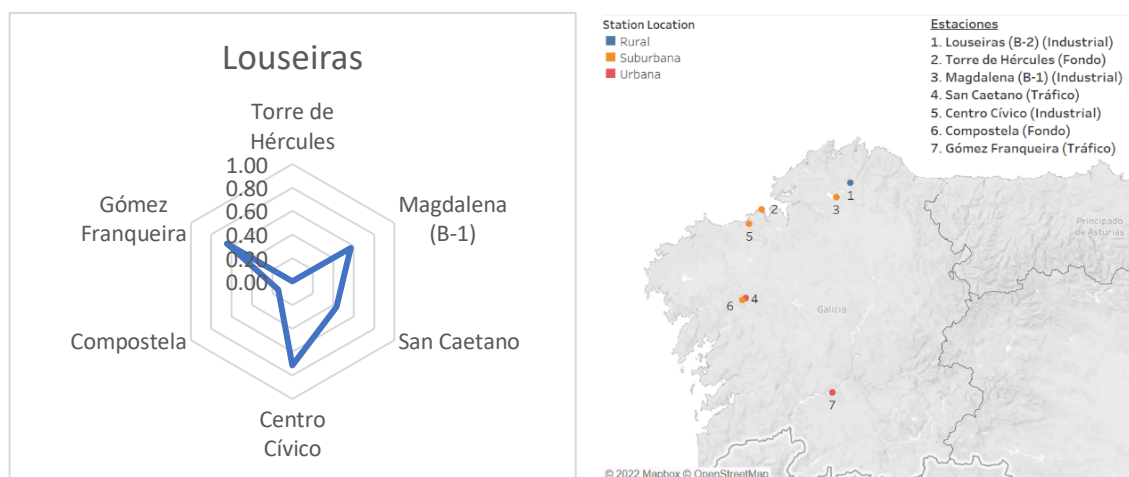
Las correlaciones más altas (0.57) se dan con San Caetano, y, curiosamente, con Arenal, la estación más alejada de Fraga Redonda, a más de 145 km de distancia. Sin embargo, atendiendo al régimen de los vientos de La Coruña (o al de Santiago de Compostela, situado un poco al sudoeste de La Coruña, más cerca de las dos estaciones mencionadas), el viento predominante es el de NE, con mucha importancia también de viento de NNE. En Santiago de Compostela el comportamiento del viento es muy similar. El O_3 tiene un componente migratorio, y se desplaza por el viento con relativa facilidad. Pese a ser una estación rural, Fraga Redonda se encuentra en el mismo municipio que la central térmica de As Pontes, por lo que las emisiones de partículas contaminantes son frecuentes. Debido a que en ocasiones los precursores del O_3 pueden ser transportados muchos km por el viento, y teniendo en cuenta que el viento predominante es el de NE, con bastante importancia del de NNE, parece razonable que los niveles de contaminación en Fraga Redonda estén correlacionados con los de San Caetano y Arenal, situados en una línea casi recta desde Fraga Redonda en dirección sur-sureste.

Por otro lado, hay una correlación de 0.07 con Gómez Franqueira. Una posible explicación es que las emisiones de la central de As Pontes influyen de manera significativa en los niveles de contaminación registrados en Fraga Redonda,

disminuyendo el impacto de las partículas transportadas por el viento desde Gómez Franqueira en los niveles de ozono en Fraga Redonda.

Louseiras es una estación de medición industrial ubicada en el municipio de Muras, en Lugo. Se encuentra a 590 m.s.n.m. Es una estación de montaña, y el municipio en el que se encuentra es conocido por tener grandes explotaciones eólicas. Se encuentra tan solo a 10 km de As Pontes de García Rodríguez, donde se encuentra la central térmica comentada anteriormente. Muestra una correlación en los niveles de O_3 (Figura 19) con las estaciones de 0.71 con Centro Cívico y de 0.64 con Gómez Franqueira. Por otro lado, no presenta correlación alguna con Torre de Hércules (0.00).

Figura 19 Correlación en los niveles de O_3 con los Louseiras y geolocalización de las estaciones analizadas



Al contrario de lo que sucede en la estación de Fraga Redonda, situada a tan solo 25 km de Louseiras, la estación de Gómez Franqueira tiene una correlación de 0.64 con Louseiras (frente a 0.07 con Fraga Redonda), algo que parece extraño dada la proximidad entre las dos estaciones ya mencionadas. Además, Louseiras se encuentra a más de 131 km de distancia de Gómez Franqueira, que es una estación urbana situada en la ciudad de Orense, cercana a la carretera N-120. En Orense predomina el viento de N y de S, y Louseiras se encuentra situado al norte de Gómez Franqueira. El hecho de que esta última se encuentre situada cercana a una carretera con cierto nivel de tráfico como es la N-120, y teniendo en cuenta que el O_3 puede formarse a gran distancia de donde se emitieron sus precursores, hace parecer razonable una correlación en los niveles de O_3 de 0.64.

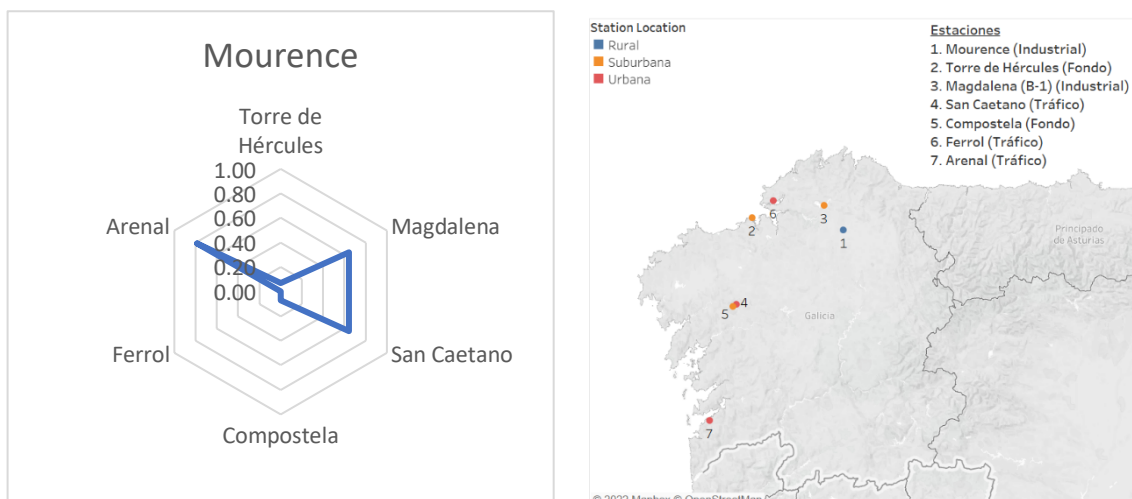
Además, el territorio que separa ambas estaciones es eminentemente rural, sin grandes núcleos urbanos entre medias (Lugo se encuentra desviado a la derecha y Santiago de Compostela desviado a la izquierda), lo que hace que no intervengan otras

partículas contaminantes que destruyan las partículas de O_3 . En cuanto a la correlación con la estación de Centro Cívico de 0.71, no se encuentra explicación alguna en el régimen de los vientos, ya que el viento predominante en la zona es el de NE, y Centro Cívico se encuentra al oeste-suroeste de Louseiras. Tampoco se explica con el tráfico de la zona, pues no hay carreteras muy transitadas que conecten ambos lugares. Es por tanto un resultado que puede ser aprovechado para extraer conclusiones que no parecerían lógicas a priori, como establecer políticas medioambientales similares en ambos lugares.

La correlación con Torre de Hércules es de 0.00. Torre de Hércules se encuentra a 20 km de Centro Cívico. Atendiendo a la explicación del párrafo anterior, es razonable que no exista correlación con Louseiras. Se pone de manifiesto de nuevo la extrañeza de la correlación de 0.71 con Centro Cívico.

Mourence es una estación industrial ubicada en el municipio de Villalba, en Lugo. Se encuentra a 469 m.s.n.m., en una zona muy tranquila, 34 km al norte de la ciudad de Lugo. Los niveles de O_3 están muy correlacionados (Figura 20) con los niveles en Arenal (0.79), y bastante correlacionados con los niveles en San Caetano (0.64) y Magdalena (0.64). La correlación inexistente con Ferrol (0.00), y muy baja con Compostela (0.07) y Torre de Hércules (0.07).

Figura 20 Correlación en los niveles de O_3 con Mourence y geolocalización de las estaciones analizadas



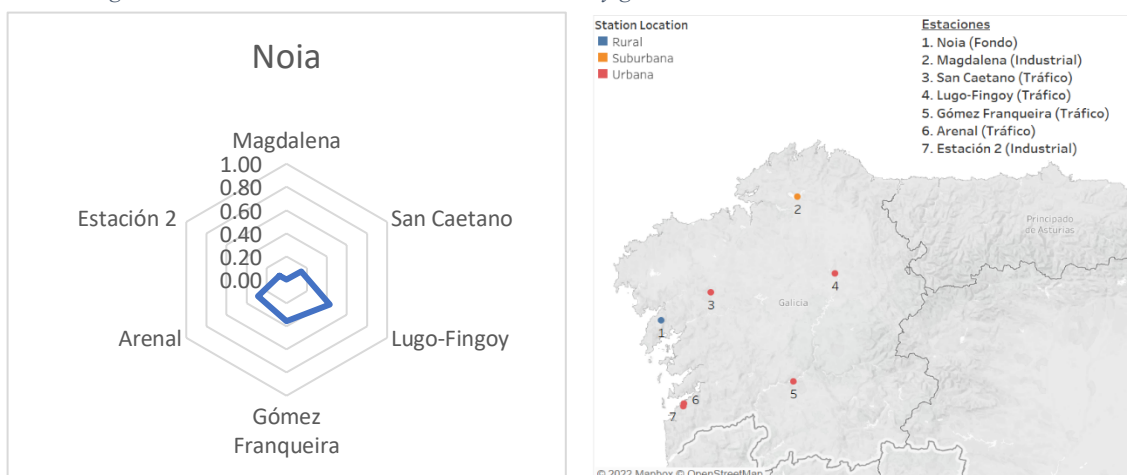
La correlación encontrada con Arenal es de 0.79, a pesar de que están situadas a más de 148 kilómetros de distancia. Acudiendo de nuevo al régimen de los vientos, se observa que tanto en Lugo como en Vigo el viento predominante es el de NNE, pero también tiene mucha relevancia el viento del SSW, y además sopla con mayor intensidad. Observando el mapa, se aprecia que Arenal se encuentra al SSW de Mourence, y además

es una estación de tráfico, por lo que el tráfico condiciona mucho sus niveles de contaminación. Una posible explicación de la correlación de 0.79 es que las partículas de O_3 emitidas por el tráfico son transportadas por el viento hacia Mourence.

La correlación con Compostela (0.07), resulta sorprendente, teniendo en cuenta que la correlación con San Caetano es de 0.64. Ambas están situadas tan solo a 2.63 kilómetros de distancia. Una explicación es que San Caetano es una estación de tráfico, con unos niveles de contaminación muy dependientes del tráfico, y que, pese a estar a 2.63 km de Compostela, el hecho de que el viento de Santiago de Compostela apenas sople desde el WSW o el ENE puede causar que las correlaciones sean tan dispares. San Caetano está situado al SW de Mourence, por lo cual esa correlación sí queda explicada por el régimen de los vientos de Santiago de Compostela y Lugo. Por otro lado, la correlación inexistente con Ferrol queda explicada de nuevo por el régimen de los vientos, ya que el viento del WNW es el que menos horas sopla al año en La Coruña.

Noia es una estación rural de fondo. Se encuentra en el municipio de Noya, en la Coruña, a 685 m.s.n.m., en el interior de la Ría de Muros y Noya. Muestra correlaciones no superiores a 0.43 (Figura 21) con las estaciones analizadas, siendo la más elevada con Lugo-Fingoy (0.43). Tiene una correlación muy baja con San Caetano (0.14), Estación 2 (0.07) y Magdalena (0.00).

Figura 21 Correlación en los niveles de O_3 con Noia y geolocalización de las estaciones analizadas

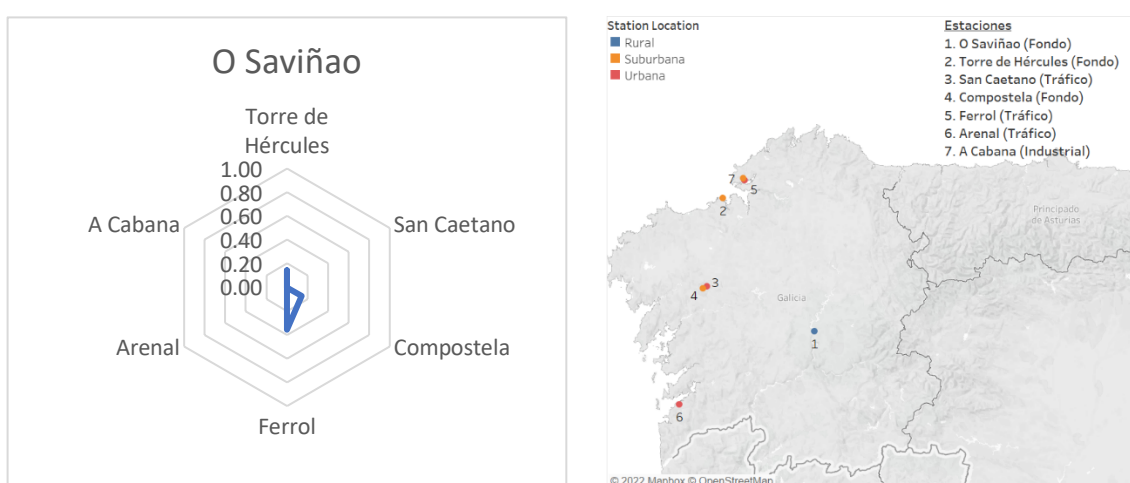


El clima de la zona en la que se encuentra Noia puede ser la causa de que las correlaciones sean iguales o inferiores a 0.43. Noia está situada en una zona muy propensa a las lluvias. Al estar a menos de 4 km de la costa, el clima es muy húmedo todo el año. La lluvia, pese a que no elimina del todo las partículas contaminantes, sí que las desplaza hacia otras zonas y diluye muchas de ellas (Ramos, 2018). Por tanto, al ser una zona con

estas características climatológicas, es normal las correlaciones con el resto de estaciones no sean superiores a 0.43 y que el régimen de los vientos no tenga tanto impacto.

O Saviñao es una estación rural de fondo. Se ubica en el municipio de Saviñao, en la provincia de Lugo, a 506 m.s.n.m. Se encuentra en una zona agrícola y ganadera, sin actividad industrial, a 98 kilómetros de Vigo y a 43 de Lugo. Al igual que sucedía con Noia, las correlaciones encontradas para O Saviñao con las estaciones analizadas son muy débiles (Figura 22). La más alta es con Ferrol (0.36), mientras que no muestra correlación en los niveles de O₃ con San Caetano (0.00), Arenal (0.00) y A Cabana (0.00).

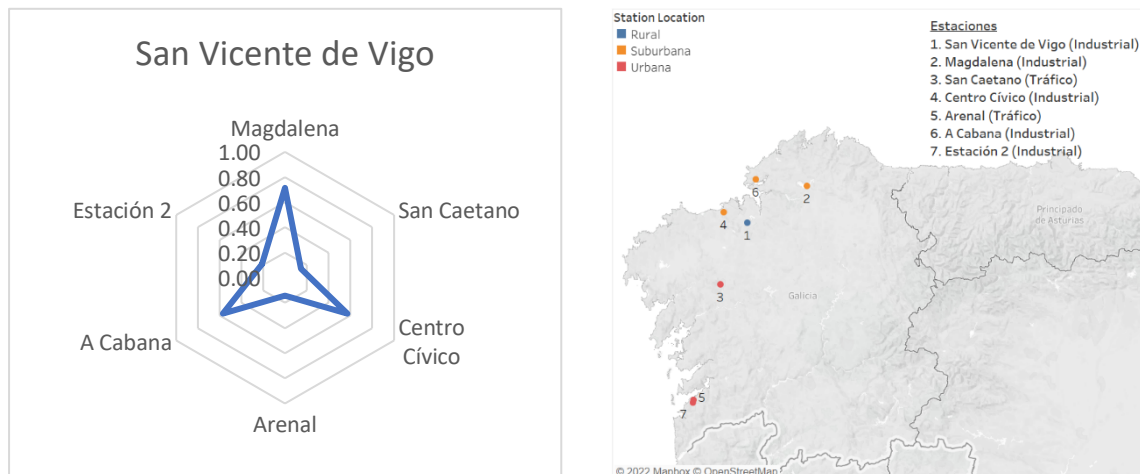
Figura 22 Correlación en los niveles de O₃ con O Saviñao y geolocalización de las estaciones analizadas



Es una estación muy aislada de las grandes superficies urbanas, enclavada en un entorno muy rural, a orillas del río Miño. Atendiendo al régimen de los vientos en Lugo, donde predomina el viento de NNE y de SSW, parece razonable que las correlaciones en los niveles de O₃ no superen 0.36.

La última estación analizada para el O₃ es **San Vicente de Vigo**, ubicada en el municipio de Cambre, en La Coruña. Se encuentra a 160 m.s.n.m. Pese a ser una estación rural, se encuentra a poco más de 15 kilómetros de un gran núcleo urbano como es La Coruña. Sus niveles de O₃ están muy correlacionados (Figura 23) con los de Magdalena (0.71). Se han encontrado correlaciones moderadas con A Cabana (0.57) y Centro Cívico (0.57). Por otro lado, se dan correlaciones bajas con San Caetano (0.14) y Arenal (0.14).

Figura 23 Correlación en los niveles de O₃ con San Vicente de Vigo y geolocalización de las estaciones analizadas



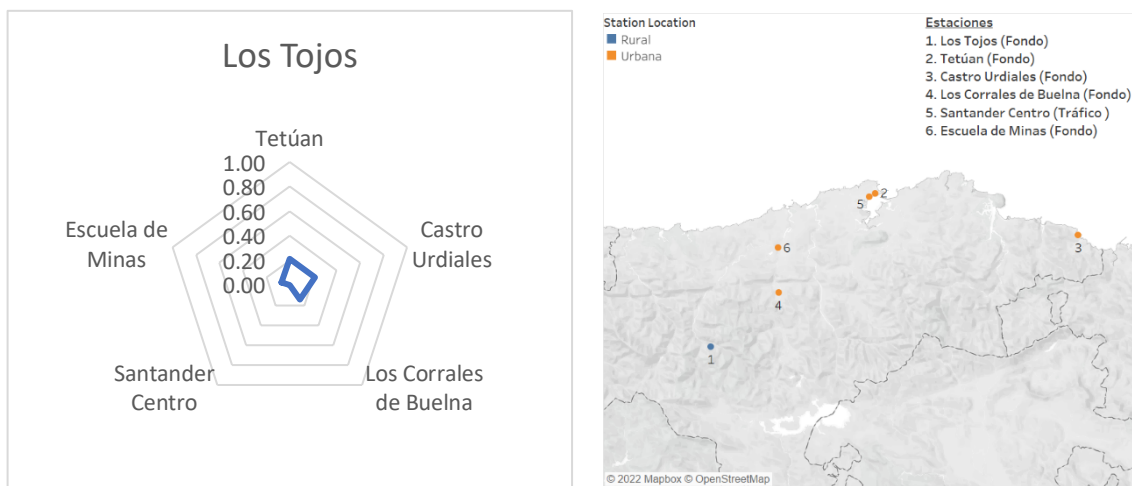
Magdalena es una estación industrial situada al NE de San Vicente de Vigo. La correlación de 0.71 con Magdalena se explica por el régimen de los vientos en La Coruña, donde el viento predominante es el de NE. Eso, sumado a la corta distancia que separa ambas estaciones (apenas 44 kilómetros), hace que los niveles de contaminación por O₃ en ambas estaciones sean tan similares. En cuanto a la correlación con A Cabana, cabe destacar la presencia de una autopista, la AP-9, que conecta las 3 estaciones. La AP-9, conocida como la autopista del Atlántico, que conecta Tui con Ferrol, pasando por La Coruña. A Cabana se encuentra en Ferrol, y la AP-9 pasa a escasos kilómetros de San Vicente de Vigo.

Por otro lado, otra gran autovía, la A-6, conocida como autovía del Noroeste, conecta San Vicente de Vigo con Centro Cívico, situado a las afueras de La Coruña. Al estar situadas A Cabana y Centro Cívico tan cerca de San Vicente de Vigo (ambas en un radio menor a 30 kilómetros), es probable que la mayoría del tráfico que haya en el tramo cercano a estas dos estaciones, siga su ruta y atravesase también el tramo cercano a San Vicente de Vigo, por lo que las emisiones por el tráfico son en cierto modo similares.

2.2 Análisis del estadístico Tau de Kendall para el PM10

Los Tojos es una estación ubicada en un entorno muy natural, en el valle del Cabuérniga. Este enclave en un valle rodeado de montañas hace que quede aislado de la influencia de la contaminación en otros lugares. Nuevamente, como ocurría con el O_3 , la correlación de los niveles de contaminación de PM_{10} en Los Tojos (Figura 24) con el resto de estaciones analizadas es muy débil (no superior a 0.21), más aún que para el caso del O_3 (no superior a 0.43) que es una partícula con un gran componente migratorio que es más fácilmente transportada por el viento que el PM_{10} , que, dentro de las partículas en suspensión, es de las más pesadas.

Figura 24 Correlación en los niveles de PM_{10} con Los Tojos y geolocalización de las estaciones analizadas



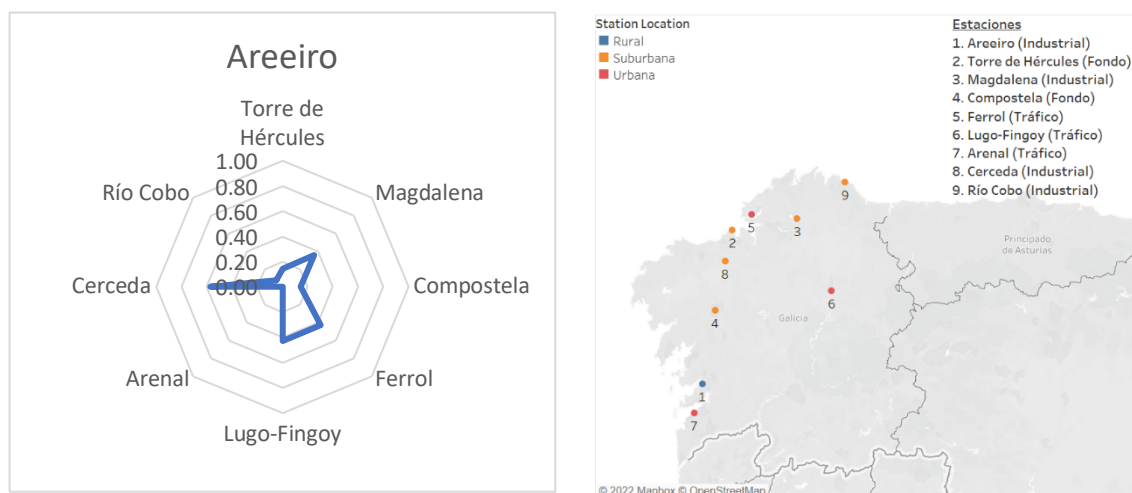
La topografía de la zona hace que la estación de Los Tojos se encuentre aislada de la influencia de contaminantes de otras zonas. Esto, sumado al régimen de los vientos en Cantabria (donde predominan los vientos del W), hace que las correlaciones en los niveles de PM_{10} sean cercanas a 0 con todas las estaciones, registrándose un máximo de 0.21 para Tetúan. La emisión de este tipo de partículas en suspensión depende de factores como el tráfico y la actividad industrial, y en la zona en la que se encuentra los Tojos, los niveles de tráfico y de actividad industrial son inferiores, y con un patrón muy diferente que los que se pueden registrar en zonas más urbanas cercanas a Santander.

Podría parecer extraña la correlación tan baja con Los Corrales Buelna (0.14), situado a tan solo 20 km de distancia, situadas a tan solo 20 km de distancia, lo que parece extraño. Una explicación es el régimen de los vientos en Cantabria, además de la topografía del lugar. En Santander (y asumiendo que es parecido en toda la Comunidad Autónoma, al no ser demasiado grande) predomina el viento de W, seguido del de WNW.

Los vientos no transportan las partículas de PM_{10} desde Los Corrales de Buelna hacia Los Tojos o viceversa, al encontrarse Los Tojos al SW de Los Corrales Buelna.

Areiro es una estación rural industrial situada en el municipio de Pontevedra, a 40 m.s.n.m. Muestra una correlación (Figura 25) media-alta con Cerceda (0.57). En el otro extremo, encontramos una correlación baja con Torre de Hércules (0.14) y Compostela (0.14), muy baja con río Cobo (0.07), y una correlación inexistente con Arenal (0.00).

Figura 25 Correlación en los niveles de PM_{10} con Areiro y geolocalización de las estaciones analizadas

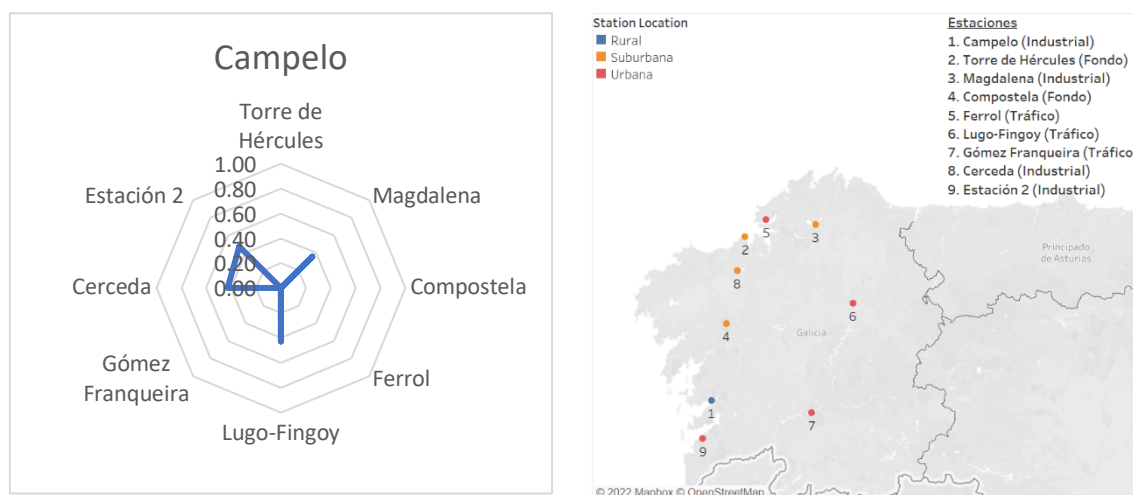


El viento predominante en Pontevedra, Vigo y Santiago de Compostela es el de NNE, lo cual explica la correlación con Cerceda. Sin embargo, atendiendo también al régimen de los vientos, es extraña la baja correlación con Compostela, situada en el medio entre Areiro y Cerceda. Resulta interesante que la correlación con Arenal sea 0.00, ya que están situadas a tan solo 21 kilómetros de distancia. En relación con la distancia, se aprecia también que Río Cobo es la estación más alejada de Areiro, y la segunda que menor correlación tiene. Por tanto, de nuevo se descarta la hipótesis de que la distancia es un factor determinante en la similitud en los niveles de contaminación entre dos puntos, aunque sí tiene impacto cuando las distancias son muy grandes.

Campelo (también analizada para el O_3) es una estación costera ubicada en Poio, en Pontevedra. Muestra una correlación media (Figura 26) con Estación 2 (0.47), Cerceda (0.43) y Lugo-Fingoy (0.43). Por otro lado, los niveles de PM_{10} en Campelo están

incorrelacionados con los de Torre de Hércules, Ferrol, Lugo-Fingoy y Gómez Franqueira (todos 0.00).

Figura 26 Correlación en los niveles de PM_{10} con Campelo y geolocalización de las estaciones analizadas

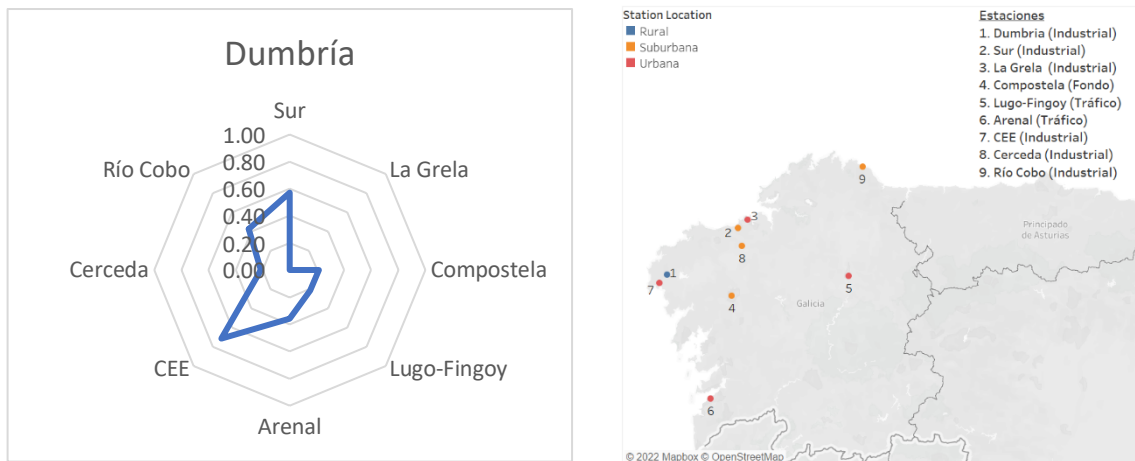


Atendiendo al régimen de los vientos en Pontevedra, se observa que el viento de SWS es bastante relevante. El hecho de que Estación 2 y Campelo estén a tan solo 25.66 kilómetros, hace que la correlación pueda estar causada por el régimen de los vientos. Al contrario de lo que sucede con el O_3 , donde la correlación con Estación 2 es la más baja (0.07), en este caso es la más alta (0.47).

Además, para el O_3 la correlación con Lugo-Fingoy es la más alta (0.71), mientras que para el PM_{10} es la más baja (de hecho, es inexistente). Por tanto, se puede apreciar que el comportamiento del nivel del PM_{10} y del O_3 entre las distintas estaciones de medición no es igual. Campelo se encuentra en una zona litoral, en una de las zonas más lluviosas de toda la Comunidad Autónoma. Como se comentó con anterioridad, la lluvia puede disolver las partículas contaminantes más grandes, como el PM_{10} (Ramos, 2018), lo que explica por qué son tan bajas las correlaciones con otras estaciones situadas más al norte y en zonas más de interior.

Dumbría es una estación rural industrial situada en el municipio de Dumbría, en La Coruña. Se encuentra a 198 m.s.n.m. Muestra una fuerte correlación (Figura 27) con CEE (0.71), y una correlación con Sur de 0.57. Se han encontrado también una correlación con Río Cobo de 0.43. La contaminación por PM_{10} en Dumbría no está correlacionada con la de La Grela (0.00), y es baja con Lugo-fingoy (0.21) y Cerceda (0.21).

Figura 27 Correlación en los niveles de PM_{10} con Dumbria y geolocalización de las estaciones analizadas

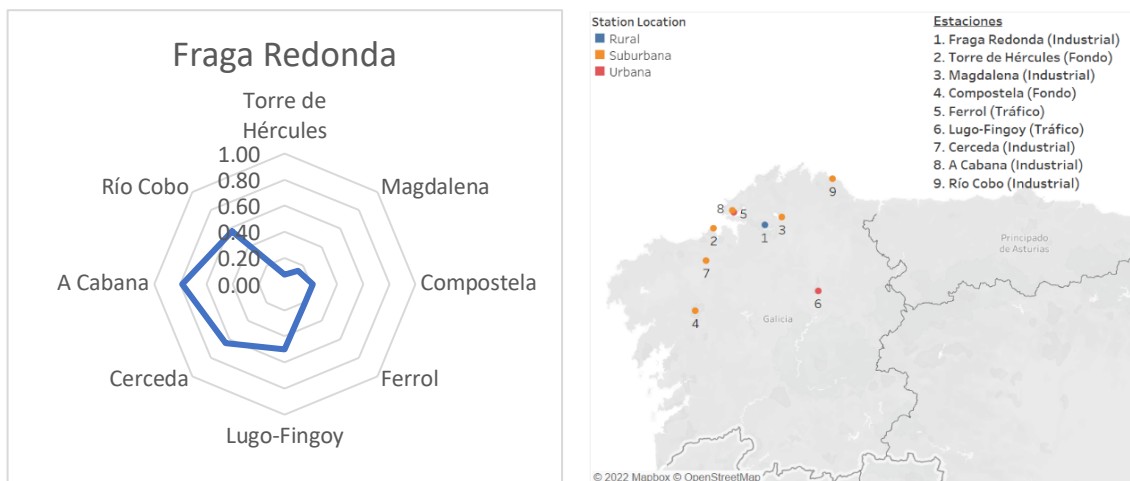


Hay que tener en cuenta que Dumbria se encuentra en la costa, en una de las zonas más lluviosas de Galicia. Esto tiene un impacto muy grande en los niveles de PM_{10} , al disolverse muchas de las partículas suspendidas en el aire por la lluvia (Ramos, 2018). De hecho, se vuelve a probar el efecto de la lluvia en los niveles de contaminación, ya que la correlación más fuerte es con CEE (0.71), que se encuentra situada a menos de 9 kilómetros, con un clima muy similar con lluvias y humedad recurrente. La correlación con estaciones situadas en el interior es baja debido al mismo motivo.

Se ha encontrado una correlación de 0.57 con Sur, y, aunque tampoco están muy próximas la una de la otra, sí tienen un clima muy similar (se encuentran situadas en el litoral, por lo que ambas tienen un clima húmedo con muchas precipitaciones). Es extraña la correlación con La Grela (0.00), situada muy cerca de Sur. La causa puede ser que La Grela se encuentra en un polígono industrial, que puede tener unos niveles de contaminación muy particulares por sus circunstancias, y debido al régimen de los vientos en La Coruña no se transporten los contaminantes hacia Sur.

Fraga Redonda se encuentra en el municipio de As Pontes de García Rodríguez, muy cerca de una de las mayores centrales térmicas de España. Muestra correlaciones bastante altas (Figura 28) con varias estaciones, destacando la correlación con A Cabana (0.79), con Cerceda (0.64) con Río Cobo (0.57) y con Lugo-Fingoy (0.57). La correlación más baja es con Torre de Hércules (0.07), seguida de Magdalena (0.14).

Figura 28 Correlación en los niveles de PM_{10} con Fraga Redonda y geolocalización de las estaciones analizadas



Al estar a menos de 11 km de la central térmica de As Pontes de García Rodríguez, los niveles de contaminación están fuertemente impactados por los contaminantes emitidos por la planta.

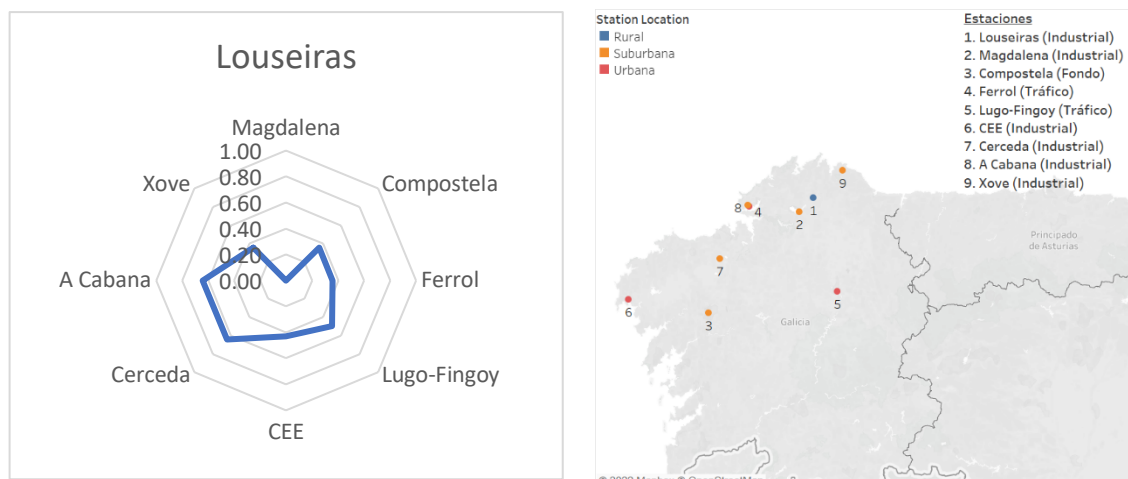
A Cabana está situado al noroeste de Fraga Redonda y el viento predominante en La Coruña es el del NE, con apenas viento que sople desde el SE, por lo que no hay explicación aparente para una correlación tan alta (0.79) entre ambas estaciones. Además, con Ferrol hay una correlación baja (0.21), pese a que está situada a menos de 1 kilómetro de distancia de A Cabana. Por tanto, se puede concluir que la correlación obtenida con A Cabana se debe a algún atípico que no se puede identificar, por lo que es otro hallazgo interesante para establecer políticas medioambientales comunes.

Las altas correlaciones con Cerceda (0.64) y con Río Cobo (0.57) se deben al régimen de los vientos de La Coruña, ya que tanto el viento de NE como el de SSW son los dos vientos predominantes. Cerceda se sitúa al SSW de Fraga Redonda mientras que Río Cobo se sitúa al NE. Torre de Hércules se sitúa al W de Fraga Redonda, por lo que se explica la baja correlación (0.07).

Magdalena, situada a tan solo 12 kilómetros de Fraga Redonda, tiene una correlación de 0.14. La central térmica de As Pontes de García Rodríguez se encuentra entre medias de ambas estaciones, por lo que tiene sentido que cuando el viento sople en dirección Fraga Redonda, las partículas de PM_{10} generadas por la central vayan en esa dirección, elevando los niveles de contaminación en esa zona, pero no en la otra, y viceversa.

La siguiente estación analizada es **Louseiras**, situada en Muras, Lugo. Como se comentó para el O₃, esta estación también se encuentra relativamente cerca de la central térmica de As Pontes. Muestra una correlación alta (Figura 29) con Cerceda (0.64) y A Cabana (0.64), y una correlación media con Lugo-Fingoy (0.50). Por otro lado, no muestra correlación con Magdalena (0.00), y muestra una correlación media-débil con estaciones como Xove (0.36) o Ferrol (0.36)

Figura 29 Correlación en los niveles de PM₁₀ Louseiras y geolocalización de las estaciones analizadas

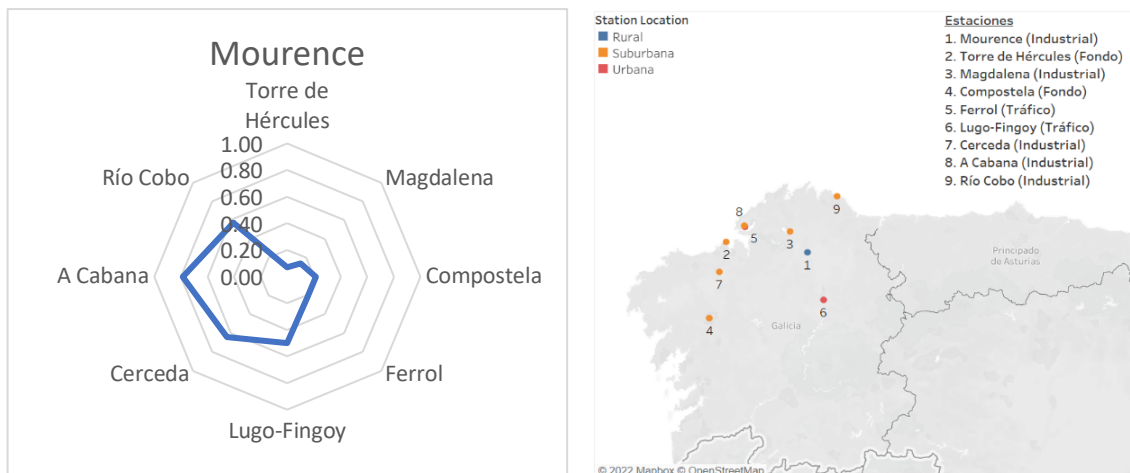


Se vuelve a dar la misma situación que para Fraga Redonda, con una correlación alta entre Louseiras y A Cabana (0.64) sin aparente explicación ni en el tráfico, ni en el régimen de los vientos, ni en el clima. Al darse dos veces resultados similares, se reafirme la hipótesis de que tanto Louseiras como Fraga Redonda tienen un comportamiento en los niveles de PM₁₀ muy similar a A Cabana, lo cual es un gran hallazgo para después establecer políticas medioambientales comunes.

La correlación con Cerceda (0.64) se explica por la situación geográfica de ambas, estando Cerceda al SSW de Louseiras, siendo el viento de SSW el segundo predominante en Lugo. La inexistencia de correlación entre Magdalena y Louseiras se explica por la localización de Magdalena, situada a menos de 2 kilómetros de la central térmica de As Pontes, por lo que, prácticamente sin importar el viento que haya, tiene unos niveles de contaminación dependientes de las emisiones de la central. Por su parte, Louseiras está situada al NE, de la central y de Magdalena, y el viento de SW tiene importancia, pero no predomina en la zona, lo que hace que los niveles de contaminación no estén sincronizados con las emisiones de la central.

Mourence se encuentra ubicada en Lugo, en una zona rural muy tranquila. Muestra una correlación (Figura 30) muy alta con A Cabana (0.79), y una correlación alta con Cerceda (0.64) y Río Cobo (0.57). Presenta una correlación media con Lugo-Fingoy (0.50) y una correlación débil con Compostela (0.21) y Ferrol (0.21). La correlación más baja se da con Torre de Hércules (0.07).

Figura 30 Correlación en los niveles de PM_{10} con Mourence y geolocalización de las estaciones analizadas

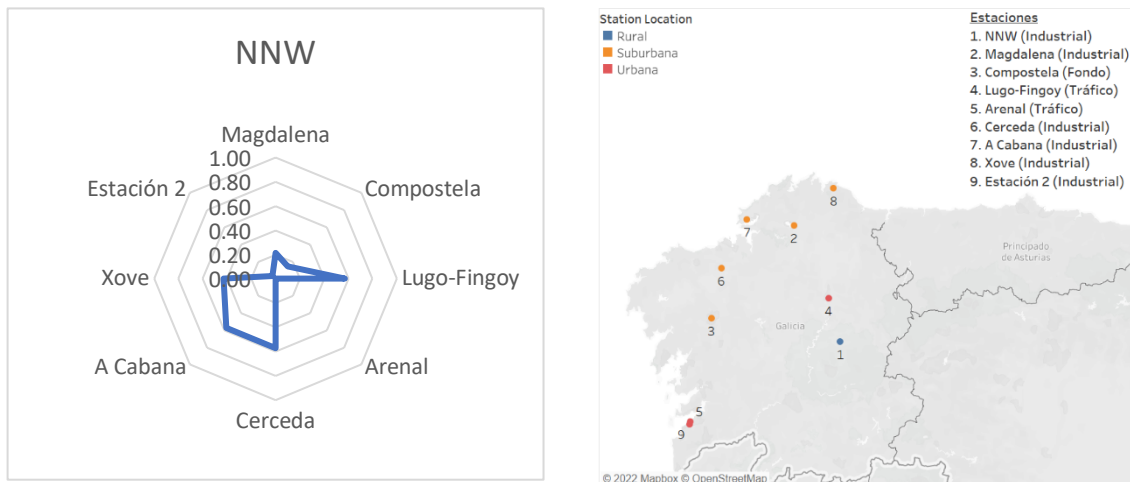


Mourence está situado aproximadamente en la misma zona en la que estaban Fraga Redonda y Louseiras, cerca de la central térmica de As Pontes. De nuevo la correlación más alta se da con A Cabana (0.79), por lo que aplica lo explicado para los casos de Fraga Redonda y Louseiras. La correlación con Cerceda también es alta (0.64), de nuevo igual que pasaba con las dos estaciones previamente analizadas. También en los 3 casos la correlación con Lugo-Fingoy es similar (entre 0.50 y 0.57 en los tres casos). Al igual que sucedía con Fraga Redonda, Torre de Hércules es la estación menos correlacionada (0.07), lo cual tiene su base en el régimen de los vientos, como ya se explicó.

Una vez analizadas las correlaciones de las distintas estaciones urbanas y suburbanas de medición con Fraga Redonda, Louseiras y Mourence, se puede concluir que el comportamiento en el nivel de PM_{10} en las 3 estaciones muestra bastantes similitudes. Muestran correlaciones altas y bajas con las mismas estaciones, en parte porque se encuentran en entornos relativamente cercanos.

NNW es una estación rural industrial situada en el municipio de Orol, en el norte de Lugo. Se encuentra a 620 m.s.n.m., y dejó de ser operativa el 10 de febrero de 2021. Muestra una correlación (Figura 32) media-alta con Lugo-Fingoy (0.57), con Cerceda (0.57) y con A Cabana (0.57). Muestra una correlación media-baja con Xove (0.43), baja con Magdalena (0.21) y Compostela (0.14) y muy baja con Estación 2 (0.04). No muestra correlación con Arenal (0.00).

Figura 31 Correlación en los niveles de PM_{10} con NNW y geolocalización de las estaciones analizadas

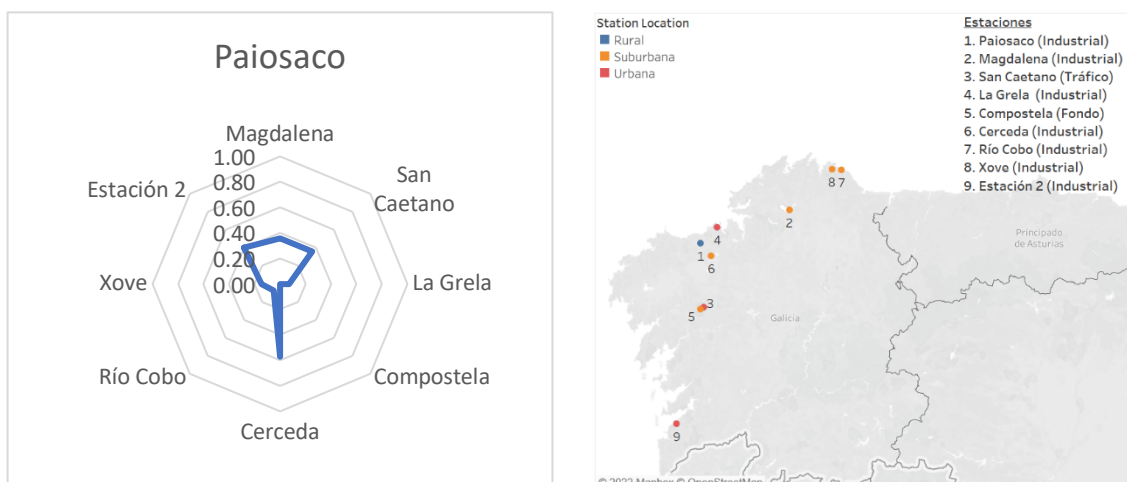


En general, es raro que la contaminación en NNW esté correlacionada con los niveles en otras estaciones, al estar situada en el este de Galicia. Los vientos predominantes en Galicia son de NNE y de SW por lo general, por lo que los vientos no son la causa de las correlaciones con Lugo-Fingoy (0.57), Cerceda (0.57) y A Cabana (0.57). Sin embargo, al igual que para las estaciones anteriores, A Cabana y Cerceda son dos de las estaciones más correlacionadas con NNW. Se empieza a observar que hay una tónica general de correlaciones altas (superiores a 0.57) con A Cabana y Cerceda, sin que haya explicación lógica a priori, lo cual es un buen hallazgo. La correlación de 0.04 con Estación 2 y de 0.00 con Arenal se explica por su ubicación (son dos estaciones situadas en la costa) y su clima con muchas precipitaciones.

Paiofaco es una estación rural industrial situado en el municipio de Larancha, al suroeste de La Coruña, a 210 m.s.n.m. Muestra una correlación (Figura 32) con Cerceda de 0.57 y con Estación 2 de 0.40. Por otro lado, muestra correlaciones muy bajas con

Xove (0.14), Río Cobo (0.07) y La Grela (0.07). No muestra correlación con Compostela (0.00).

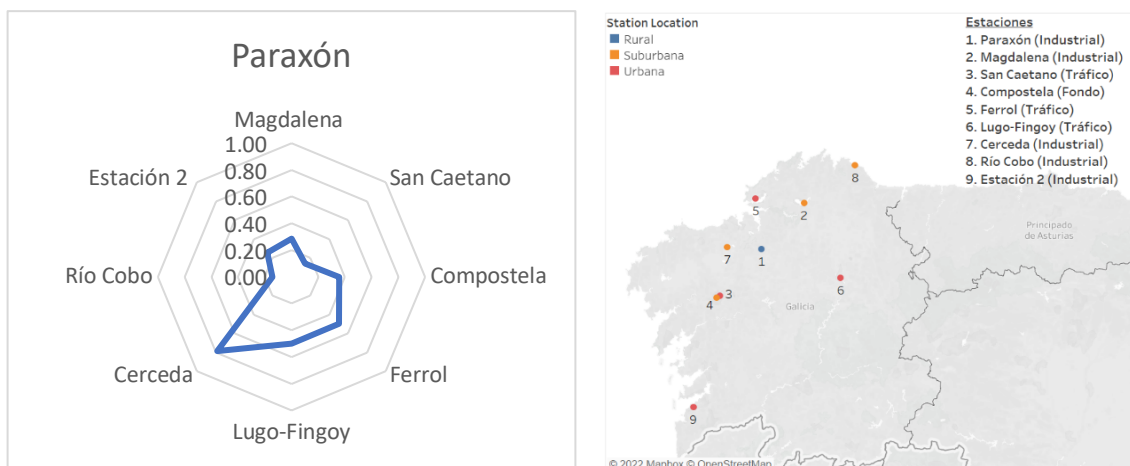
Figura 32 Correlación en los niveles de PM_{10} Paiosaco y geolocalización de las estaciones analizadas



Esta estación, a diferencia de las anteriores, está situada en el litoral, y no en el interior. La correlación con Cerceda se podría explicar porque ambas están situadas cerca de La Coruña, una de las grandes ciudades de España, por lo que la contaminación emitida en La Coruña es transportada por el viento de NNE y NE hacia ambas estaciones. Sin embargo, la baja correlación con La Grela (0.07), ubicada en la ciudad de La Coruña, descarta esa hipótesis. La baja correlación con Río Cobo (0.07) se explica porque entre ambas estaciones se encuentra la central térmica de As Pontes, por lo que dependiendo de hacia dónde sople el viento, la contaminación emitida por la central se transporta hacia un lugar o el otro. Finalmente, Compostela y San Caetano están situadas muy próximas entre ellas, a menos de 3 km, al sur de Paiosaco, por lo que, en base al régimen de los vientos, cobra sentido que no haya correlación destacable con Paiosaco.

Paraxón es una estación rural industrial situada en el municipio de Cesuras, en La Coruña. Se encuentra a 380 m.s.n.m. Paraxón muestra una correlación (Figura 33) fuerte con Cerceda (0.79), y una correlación media con Ferrol (0.50) y Lugo-Fingoy (0.50). También muestra correlaciones bajas con Río Cobo (0.14) y con San Caetano (0.14).

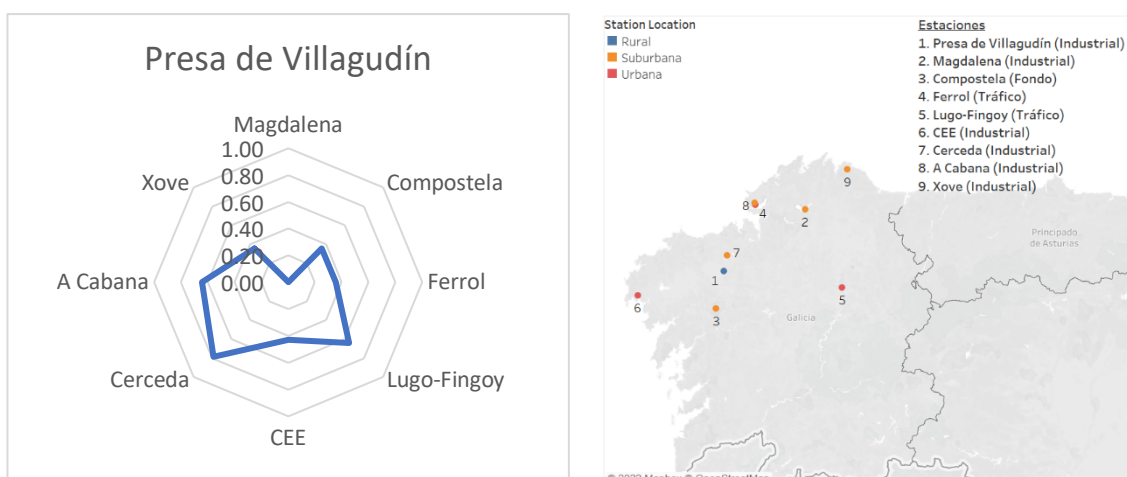
Figura 33 Correlación en los niveles de PM_{10} con Paraxón y geolocalización de las estaciones analizadas



Paraxón se encuentra aproximadamente en la misma zona que las estaciones rurales de Mourence, Louseiras y Fraga Redonda, en el norte de Galicia, pero en el interior. Al igual que en los casos analizados de esas estaciones, la correlación con Cerceda es muy alta (0.79), y no se explica ni con el tráfico, ni con el clima, ni con el régimen de los vientos. La correlación con Río Cobo (0.14) se explica de nuevo por la presencia de la central de As Pontes entre ellas. En general, las correlaciones encontradas para Paraxón se parecen bastante a las encontradas para las estaciones mencionadas arriba.

La última estación analizada para el PM_{10} es **Presa de Villagudín**. Es una estación rural de tipo industrial, situada en el municipio de Ordes, en La Coruña. Se encuentra a 270 m.s.n.m. Muestra una correlación (Figura 34) muy alta con Cerceda (0.79), y alta con A Cabana (0.64) y con Lugo-Fingoy (0.64). Muestra también una correlación con CEE de 0.43, y con Xove, Ferrol y Compostela de 0.36. No muestra correlación con Magdalena (0.00).

Figura 34 Correlación en los niveles de PM_{10} con Presa de Villagudín y geocalización de las estaciones analizadas

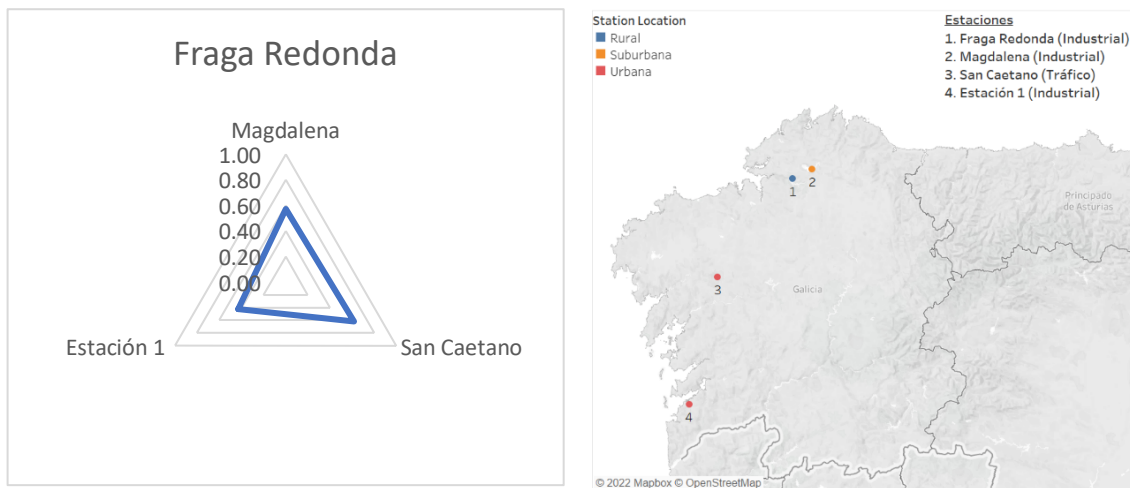


Nuevamente se da una alta correlación con Cerceda, esta vez con aparente explicación, ya que ambas estaciones se encuentran a tan solo 11 km de distancia. Además, Cerceda está situada al NNE de Presa de Villagudín, por lo que, atendiendo al régimen de los vientos en La Coruña, tiene lógica que los niveles de contaminación se comporten de manera similar en ambos lugares. La correlación con Lugo-Fingoy (0.64) no parece lógica a priori, ya que no hay grandes carreteras que conecten ambos lugares ni un viento predominante en esa dirección. Finalmente, la correlación de 0.00 con Magdalena se explica por la cercanía de esta última con la central de As Pontes, situadas a 2 km de distancia, ya que sus niveles de contaminación por PM_{10} están fuertemente influenciados por las emisiones de la central.

2.3 Análisis del estadístico Tau de Kendall para el $PM_{2,5}$

La primera estación analizada para el $PM_{2,5}$ es **Fraga Redonda**. Se encuentra a menos de 11 km de la central térmica de As Pontes. Muestra una correlación (Figura 35) de 0.62 con San Caetano, de 0.57 con Magdalena y de 0.43 con Estación 1.

Figura 35 Correlación en los niveles de $PM_{2,5}$ con Fraga Redonda y geolocalización de las estaciones analizadas

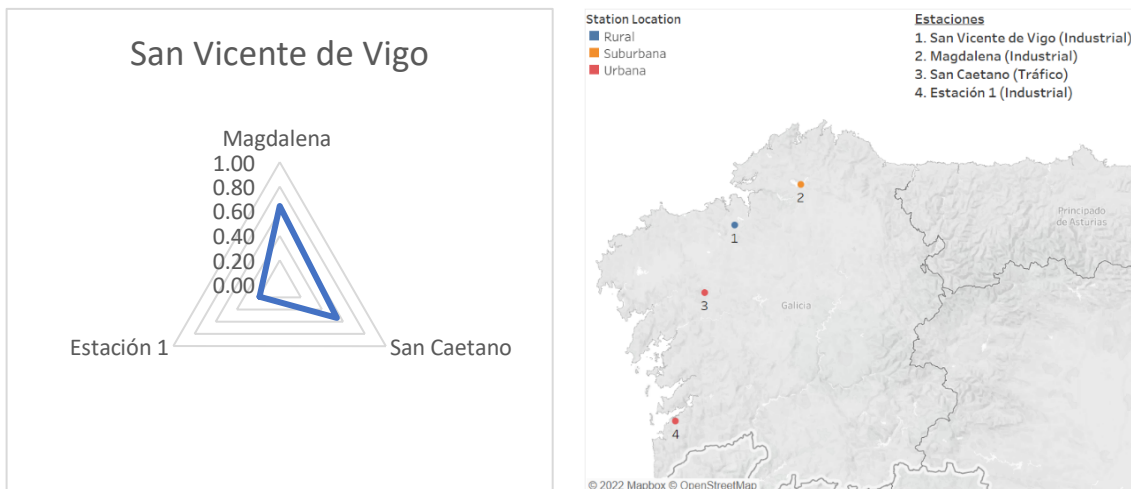


A diferencia de lo que ocurre con el PM_{10} , la correlación con Magdalena es de 0.57 (para el PM_{10} es de 0.14). Como se explicó para el PM_{10} , la central de As Pontes se encuentra entre medias de ambas estaciones. La explicación para la diferencia en las correlaciones de los niveles de PM_{10} y $PM_{2,5}$ entre ambas estaciones puede radicar en el peso de las partículas, ya que el $PM_{2,5}$ tiene un peso menor y puede ser transportado con menor intensidad del viento, aunque es solo una hipótesis. Puede ser también porque la central emita volúmenes muy distintos de PM_{10} y $PM_{2,5}$. Sin embargo, atendiendo al régimen de los vientos, es lógico que la correlación con Magdalena sea alta, ya que predomina el viento de NE en la zona. Este viento transporta las partículas de $PM_{2,5}$ emitidas por la central hacia Fraga Redonda.

La correlación de 0.62 con San Caetano se debe al régimen de los vientos, ya que en La Coruña predomina el viento de NE, por lo que las partículas de $PM_{2,5}$ emitidas por la central son transportadas al suroeste por el viento. La correlación de 0.43 con Estación 1 se explica también por el viento, aunque, al estar a bastante más distancia, la correlación es un más baja.

La siguiente estación analizada es **San Vicente de Vigo**. Muestra una correlación (Figura 36) de 0.64 con Magdalena, de 0.54 con San Caetano, y de 0.19 con Estación 1.

Figura 36 Correlación en los niveles de $PM_{2,5}$ con San Vicente de Vigo y geolocalización de las estaciones



San Vicente de Vigo está situada en una zona cercana a Fraga Redonda, a 32 km de distancia, por lo que las correlaciones con Magdalena, San Caetano y Estación 1 son parecidas en ambas estaciones, ya que les afectan los mismos factores. En este caso, la correlación en los niveles de PM_{10} con Magdalena (0.64) sí es parecida a la correlación obtenida para el O_3 (0.71). Esta se basa en el régimen de los vientos, ya que el viento predominante en la zona es el de NE. El viento transporta las partículas de $PM_{2,5}$ emitidas por la central de As Pontes, situada a tan solo 2 km de Magdalena, hasta San Vicente de Vigo, primero, y hasta San Caetano y Estación 1, después. La correlación es menor con estas dos últimas estaciones debido a que no todas las partículas emitidas son transportadas por el viento, viéndose reducido el volumen total a medida que se recorre más distancia.

CONCLUSIONES

Una vez analizadas las correlaciones en los niveles de contaminación entre las distintas estaciones, se pueden extraer varias conclusiones, que contestan a las hipótesis planteadas en la introducción de este trabajo. Adicionalmente, se han encontrado varios hallazgos interesantes.

En primer lugar, se ha demostrado que la proximidad entre estaciones no es determinante para la similitud en los niveles de contaminación. Se han expuesto casos en los que, pese a que dos estaciones estaban situadas a muy poca distancia, mostraban una correlación muy baja. Por el contrario, había estaciones muy distanciadas que mostraban un comportamiento en el nivel de contaminación muy similar. Sin perjuicio de que se den casos como los dos antes mencionados, sí que se puede concluir que la distancia entre estaciones impacta a los niveles de correlación, aunque no sea el factor más influyente. En muchos de los casos analizados, se ha visto que, dos o más estaciones situadas en la misma dirección aproximadamente respecto a la estación rurales mostraban niveles altos de correlación con la estación rural. Sin embargo, la estación más próxima mostraba una correlación más fuerte, debido a que el viento no transporta el mismo número de partículas contaminantes a ambos lugares, llegando menor volumen al punto más alejado de los dos.

En segundo lugar, se ha comprobado como el viento es probablemente el factor más determinante para explicar las similitudes en los niveles de contaminación entre estaciones. Cuando había una correlación fuerte en la contaminación entre varias estaciones, en casi todos los casos el viento tenía un impacto determinante. A pesar de que dos estaciones estén separadas por grandes distancias, si el viento predominante en la zona sopla en la dirección en la que estaba situada una respecto de la otra (generalmente la rural respecto de la urbana o suburbana), es frecuente que haya una correlación media-alta o alta entre ambas. Por tanto, se puede concluir que tanto el O₃ como las partículas migratorias (PM₁₀ y PM_{2,5}) tienen un comportamiento migratorio.

En tercer lugar, se ha contrastado la hipótesis de que la contaminación en las zonas rurales está influenciada por las emisiones de zonas urbanas o suburbanas. Se han observado muchos casos en los que había fuertes correlaciones entre estaciones rurales y urbanas o suburbanas. Es cierto que no todas las estaciones rurales están afectadas por la contaminación de otras zonas. Determinadas circunstancias, como el clima específico o la topografía, puede hacer que la contaminación de las zonas urbanas y suburbanas no se

transporte hacia zonas rurales y no se encuentren correlaciones fuertes. Es el caso de Los Tojos, con una topografía específica que lo aísla de influencia externa, o el de Dumbria, cuya localización y clima lluvioso hacen que solo se esté correlacionada con CEE, una estación muy cercana con el mismo clima. Sin embargo, a excepción de este tipo de casos, se ha observado como muchas estaciones rurales mostraban correlaciones fuertes con estaciones urbanas y suburbanas, por los motivos expuestos en los párrafos anteriores.

Adicionalmente, se han encontrado otros factores que afectan a la correlación en los niveles de contaminación entre zonas rurales y urbanas o suburbanas. El primero de ellos es el clima. Las estaciones situadas en zonas más lluviosas tienden a tener correlaciones bajas con casi todas las estaciones salvo con las que se encuentran en su misma zona con un clima similar. La lluvia disuelve parte de las partículas contaminantes (Ramos, 2018), por lo que la contaminación procedente de otras zonas urbanas o suburbanas menos lluviosas no tiene tanto impacto en estas estaciones ubicadas en el litoral gallego.

Otro factor con relevancia es el tráfico. Determinadas estaciones conectadas por carreteras muy transitadas tienen correlaciones altas entre ellas, especialmente cuando están situadas relativamente próximas. Esto se debe a que las emisiones producidas por los vehículos que transitan por la carretera son constantes a lo largo del trayecto. Cuando la carretera se trata de una autopista o autovía muy transitada, la contaminación emitida por los vehículos es la principal fuente de contaminación, por lo que los niveles de contaminación en las dos estaciones conectadas son similares, haciendo que se den correlaciones altas. Por último, hay determinados elementos externos, como una fábrica o una central, que, por el volumen total de sus emisiones, la contaminación emitida afecta a muchas estaciones cercanas (o incluso algo alejadas). Es el caso de la central térmica de As Pontes, una de las centrales más contaminantes en toda España. Se ha comprobado como las estaciones situadas en los alrededores suelen tener correlaciones altas entre ellas, ya que la principal fuente emisora en los alrededores es la central, sin que haya otras fuentes que puedan afectar a los niveles de contaminación en las estaciones de la zona.

Por último, el objetivo principal de este trabajo era encontrar similitudes en el comportamiento de los niveles de contaminación en distintas zonas, para así poder establecer políticas medioambientales comunes. Aparte de la explicación de los factores que causan las altas correlaciones entre estaciones, el valor de este trabajo radica en el descubrimiento de correlaciones que no son aparentes, pero no por ello son menos ciertas.

Es el caso, por ejemplo, de las altas correlaciones encontradas entre los niveles de PM₁₀ recogidos por las estaciones rurales del norte de Galicia situadas en el interior, en los alrededores de la central de As Pontes, con A Cabana, Cerceda o Río Cobo. El descubrimiento de estas correlaciones no evidentes permite el desarrollo de medidas medioambientales conjuntas que de otra forma no podrían haber sido aplicadas.

BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Europea del Medio Ambiente. (2019). *The European environment – state and outlook 2020: Knowledge for transition to a sustainable Europe*. <https://doi.org/10.2800/96749>
- Aránguez, E., Ordóñez, J.M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández-Patier, R., Gandarillas y A., Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Revista Española de Salud Pública*. Recuperado de https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S1135-57271999000200003&script=sci_arttext&tlng=pt
- Ayuntamiento de Madrid. (s.f.). *Valores límite de los contaminantes*. Recuperado de <http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/calibre/ContAtmosferica/Contaminantes/ValoresLimite.html>
- Benavides Ballesteros, H. O. y León Aristizabal, G.E. (2007). *Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>
- Betancourt, A., Valencia, D., Soffritti, M. y Budría, S. (2021). *An analysis of ozone pollution by using functional data: rural and urban areas of the Community of Madrid*. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09180-1>
- Klein, A., Ancellet, G., Ravetta, F., Thomas, J. L. y Pazmino, A. (2017). Characterizing the seasonal cycle and vertical structure of ozone in Paris, France using four years of ground based LIDAR measurements in the lowermost troposphere. *Atmospheric Environment*, 167, 603–615. <https://doi.org/10.1016/j.atmos.env.2017.08.0161352-2310>
- Madrid Salud. Página de salud pública del Ayuntamiento de Madrid. (s.f.). Partículas en suspensión y salud. Recuperado de <https://madridsalud.es/particulas-en-suspension-y-salud/>

- Mantilla, E., Castell, N., Salvador, R., Azorín, C., Millán, M., Miró, J., y Juan, L. (2008). Ozono troposférico y calidad del aire. *Valencia: Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Comunitat Valenciana*. Recuperado de <http://www.agroambient.gva.es/documents/20549779/161512949/Ozono+troposferico+y+calidad+del+aire.+Libro+completo>
- Meteoblue. (2022). *Datos climatológicos e históricos*. Recuperado de <https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Ozono*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/ozono.aspx>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Partículas*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/particulas.aspx>
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s.f.). *Partículas en suspensión*. Recuperado de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/particulas.aspx>
- National Cancer Institute (s.f.). *Diccionario del NCI: Alvéolos*. Recuperado de <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/alveolos>
- Organización Mundial de la Salud. (2002). *Informe de Estado de la salud en el mundo: 2002: reducir los riesgos y promover una vida sana*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/42557>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: Partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono: Resumen ejecutivo*. Recuperado de <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. Recuperado de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Paloetti, E., De Marco, A., Beddows, D. C., Harrison, R. M., y Manning, W. J. (2014). Ozone levels in European and USA cities are increasing more than at rural sites, while peak values are decreasing. *Environmental Pollution*, 192, 295-299. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.04.040>
- Porter, W. C. Khalil, M. A. K., Butenhoff, C. L., Almazroui, M., Al-Khalaf, A. K. y Al-Sahafi, M. S. (2014). Annual and weekly patterns of ozone and particulate matter in Jeddah Saudi Arabia. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(7), 817-826. <https://doi.org/10.1080/10962247.2014.893931>
- Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Perez, N., Lee, H. K., Eun, H. R., Park, Y., Mantilla, E., Escudero, M., Titos, G., Alonso, L., Temime-Roussel, B., Marchand, N., Moreta, J. R., Revuelta, M. A., Salvador, P., Artíñano, B., García-dos Santos, S., Anguas, M., ... Ahn, K. H. (2018). Phenomenology of summer ozone episodes over the Madrid Metropolitan Area central Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9), 6511–6533. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6511-2018>
- Ramos, A. (2018) ¿Es la lluvia el mejor arma contra la contaminación? *Eltiempo*. Recuperado de <https://www.eltiempo.es/noticias/lluvia-contaminacion-viento-limpiar-atmosfera>
- Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire. (BOE núm. 25, de 29 de enero de 2011).
- Valencia, D., Lillo, R. E., Romo, J. (2019). A Kendall correlation coefficient between functional data. *Advances in Data Analysis and Classification*, 13(4), 1083–1103. <https://doi.org/10.1007/s11634-019-00360-z>

ANEXO

Listado de las estaciones de medición analizadas

Estación	Contaminante	Área	Tipo	Municipio	Provincia
Los Tojos	O ₃ , PM ₁₀	Rural	Fondo	Los Tojos	Cantabria
Campelo	O ₃ , PM ₁₀	Rural	Industrial	Poio	Pontevedra
Fraga Redonda	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2,5}	Rural	Industrial	Las Puentes de García Rodríguez	La Coruña
Louseiras	O ₃ , PM ₁₀	Rural	Industrial	Muras	Lugo
Mourence	O ₃ , PM ₁₀	Rural	Industrial	Villalba	Lugo
Noia	O ₃	Rural	Industrial	Noia	La Coruña
O Saviñao	O ₃	Rural	Industrial	O Saviñao	Lugo
San Vicente de Vigo	O ₃ , PM _{2,5}	Rural	Industrial	Cambre	La Coruña
Areeiro	PM ₁₀	Rural	Industrial	Pontevedra	Pontevedra
Dumbría	PM ₁₀	Rural	Industrial	Dumbría	La Coruña
NNW	PM ₁₀	Rural	Industrial	Ourol	Lugo
Paiosaco	PM ₁₀	Rural	Industrial	Laracha	La Coruña
Paraxón	PM ₁₀	Rural	Industrial	Cesuras	La Coruña
Presa de Villagudín	PM ₁₀	Rural	Industrial	Ordes	La Coruña
Torre de Hércules	O ₃ , PM ₁₀	Suburbana	Fondo	La Coruña	La Coruña
Magdalena	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2,5}	Suburbana	Industrial	Las Puentes de García Rodríguez	La Coruña

Centro Cívico	O ₃	Suburbana	Industrial	Arteixo	La Coruña
Compostela	O ₃ , PM ₁₀	Suburbana	Fondo	Santiago de Compostela	La Coruña
A Cabana	O ₃ , PM ₁₀	Suburbana	Industrial	Ferrol	La Coruña
Sur	PM ₁₀ , PM _{2,5}	Suburbana	Industrial	Ourol	Lugo
Cerceda	PM ₁₀	Suburbana	Industrial	Cerceda	La Coruña
Río Cobo	PM ₁₀	Suburbana	Industrial	Cervo	Lugo
Xove	PM ₁₀	Suburbana	Industrial	Xove	Lugo
Estación del Mediterráneo	O ₃	Suburbana	Industrial	El Astillero	Cantabria
San Caetano	O ₃ , PM ₁₀ , PM _{2,5}	Urbana	Tráfico	Santiago de Compostela	La Coruña
Ferrol	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Tráfico	Ferrol	La Coruña
Lugo-Fingoy	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Tráfico	Lugo	Lugo
Gómez Franqueira	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Tráfico	Orense	Orense
Arenal	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Tráfico	Vigo	Pontevedra
Estación 2	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Industrial	Vigo	Pontevedra
La Grela	PM ₁₀	Urbana	Industrial	La Coruña	La Coruña
CEE	PM ₁₀	Urbana	Industrial	CEE	La Coruña
Estación 1	PM _{2,5}	Urbana	Industrial	Vigo	Pontevedra
Parque de Cross	O ₃	Urbana	Industrial	Camargo	Cantabria
Reinosa	O ₃	Urbana	Fondo	Reinosa	Cantabria
Zapatón	O ₃	Urbana	Fondo	Torrelavega	Cantabria
Tetuán	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Fondo	Santander	Cantabria

Castro Urdiales	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Fondo	Castro Urdiales	Cantabria
Los Corrales de Buelna	O ₃ , PM ₁₀	Urbana	Fondo	Los Corrales de Buelna	Cantabria
Santander Centro	PM ₁₀	Urbana	Tráfico	Santander	Cantabria
Escuela de Minas	PM ₁₀	Urbana	Fondo	Torrelavega	Cantabria