



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Facultad de Ciencias

GRADO EN FÍSICA

TRABAJO FIN DE GRADO

**Diagnóstico de la calidad del aire
en Granada mediante sensores de red
inteligente**

Presentado por:

D. Francisco José Mantell Zamudio

Curso Académico 2021/2022

Resumen

La emisión de gases contaminantes y partículas de aerosol a la atmósfera afecta a la calidad del aire, lo que constituye un problema a nivel mundial. Ello ha conllevado al desarrollo de directivas a nivel europeo y estatal que regulen las emisiones de contaminantes a la atmósfera. Bajo éste contexto, el presente trabajo plantea como objetivo principal el estudio de los principales gases contaminantes (NO_2 , O_3 , SO_2 y CO), junto con las partículas de aerosol de diferente tamaño (PM_1 , $PM_{2.5}$ y PM_{10}) en un entorno urbano como Granada. Para ello, se ha utilizado, para un período completo de un año (2021) en Granada, los datos proporcionados por la red de calidad del aire de la Junta de Andalucía (dos estaciones de medida) y la Red Airly de sensores inteligentes low cost (3 estaciones de medida). Los valores horarios promedios obtenidos para el NO_2 , O_3 , SO_2 , CO , PM_1 , $PM_{2.5}$ y PM_{10} están entre 19.8 y 33.2, 42.8 y 56.6, 4.9 y 6.9, 326.1 y 680.0, 8.4 y 9.3, 12.3 y 12.4 y 17.6 y 28.6 $\mu g/m^3$, respectivamente, lo que entra de los límites establecidos por la normativa estatal. Se han obtenido sinergias entre las PM_X , así como entre CO y NO_2 (0.5), y entre NO_2 y O_3 (-0.61) para algunas estaciones concretas, así como patrones horarios y estacionales típicos, tanto en PM como en ciertos gases (NO_2 y CO).

Abstract

Gas and particulate matter emission affects to the air quality and actually its a global scale problem. This problem has led to the development of directives at national and European level that regulate the emissions of pollutants. Under this context, the present work raises as main objective the study of main polluting gases (NO_2 , O_3 , SO_2 and CO) and particulate matter (PM_1 , $PM_{2.5}$ y PM_{10}) in a urban environment like Granada. The study use a data set for a complete period of one year (2021) at Granada, provided by the air quality network of the Junta de Andalucía (two stations of measure) and de Airly Network of low cost sensors (three stations of measure). The averaged hourly values obtained for NO_2 , O_3 , SO_2 , CO , PM_1 , $PM_{2.5}$ and PM_{10} are between 19.8 and 33.2, 42.8 and 56.6, 4.9 and 6.9, 326.1 and 680.0, 8.4 and 9.3, 12.3 and 12.4 and 17.6 and 28.6 $\mu g/m^3$, respectively, that are in order to the limits of the national regulation. Synergies between PM, between CO and NO_2 (0.5) and between NO_2 and O_3 (-0.61) have been obtained for concrete stations, as well as hourly and seasonal patterns in PM and some gases (like NO_2 and CO).

Índice

1	Introducción.	7
2	Instrumentación y localización experimental.	8
3	Metodología.	9
4	Resultados.	11
4.1	Sinergia entre las diferentes variables.	13
4.2	Análisis de la evolución diaria y mensual.	15
4.3	Análisis de la evolución horaria.	20
4.4	Análisis de la evolución semanal.	24
4.5	Análisis de la evolución estacional.	28
4.6	Superaciones de valores legislados.	31
5	Resumen y conclusiones más relevantes.	33
	Referencias	34

Índice de figuras

1	Mapa con las localizaciones de las distintas estaciones de medida.	9
2	Serie anual para PM_{10} en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la Red Airly. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.	15
3	Serie anual para PM_{10} en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la red de la Junta de Andalucía. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.	16
4	Serie anual para NO_2 en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la Red Airly. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.	17
5	Serie anual para NO_2 en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la red de la Junta de Andalucía. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.	17
6	Superposición de intrusiones de polvo sahariano a las concentraciones diarias de PM_{10} para la red Airly. Las franjas verdes indican los períodos de intrusión.	19
7	Superposición de intrusiones de polvo sahariano a las concentraciones diarias de PM_{10} para la red de la Junta de Andalucía. Las franjas verdes indican los períodos de intrusión.	19
8	Valores medios horarios de concentración de PM_{10} junto con las desviaciones estándar para la Red Airly, obtenidos como la media anual para un intervalo horario concreto.	20
9	Valores medios horarios de concentración de PM_{10} junto con las desviaciones estándar para la red de la Junta de Andalucía, obtenidos como la media anual para un intervalo horario concreto.	21
10	Valores horarios medios de concentración de NO_2 junto con las desviaciones estándar para la Red Airly.	22
11	Valores horarios medios de concentración de NO_2 junto con las desviaciones estándar para la red de la Junta de Andalucía.	23
12	Valores medios horarios de concentración de O_3 junto con las desviaciones estándar para la Red Airly.	24
13	Valores medios horarios de concentración de O_3 junto con las desviaciones estándar para la red de la Junta de Andalucía.	24
14	Valores medios según el día de la semana, a partir de los valores medios anuales para un día de la semana en concreto, junto con las correspondientes desviaciones estándar, para la Red Airly.	25
15	Valores medios según el día de la semana, a partir de los valores medios anuales para un día de la semana en concreto, junto con las correspondientes desviaciones estándar, para la red de la Junta de Andalucía.	25
16	Concentraciones medias de O_3 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la Red Airly.	26

17	Concentraciones medias de O_3 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la red de la Junta de Andalucía.	27
18	Concentraciones medias de SO_2 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la red de la Red Airly.	27
19	Concentraciones medias de SO_2 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la red de la red de la Junta de Andalucía.	28
20	Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de PM_{10} para cada estación de medida.	29
21	Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de NO_2 para cada estación de medida.	29
22	Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de O_3 para cada estación de medida.	30
23	Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de SO_2 para cada estación de medida.	30
24	Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de CO para cada estación de medida.	31

Índice de tablas

1	Especificaciones técnicas de los sensores de la Red Airly.	8
2	Tabla donde se especifica qué contaminante mide cada una de las estaciones.	9
3	Estadística anual para las estaciones de la Red Airly.	11
4	Estadística anual para las estaciones de la Junta de Andalucía.	11
5	Correlaciones entre las variables de la estación de CEAMA.	13
6	Correlaciones entre las variables de la estación de Santo Domingo.	13
7	Correlaciones entre las variables de la estación de Centro Lorca.	13
8	Correlaciones entre las variables de la estación de Granada Norte.	14
9	Correlaciones entre las variables de la estación de Palacio de Congresos.	14
10	Días de episodios de intrusión de polvo sahariano. Fuente: MITECO [4].	18
11	Valores límite anuales para cada contaminante y superaciones por estación.	31
12	Superaciones de los valores legislados por contaminante y estación.	32

1 Introducción.

La contaminación del aire es un proceso en el que se alteran las características naturales de la atmósfera mediante sustancias que pueden llegar a tener efectos nocivos sobre la salud humana o el medio ambiente. Las sustancias que producen ésta contaminación se denominan contaminantes y, en general, suelen estar producidos de forma directa o indirecta por la acción del ser humano, aunque también pueden tener un origen natural [13, 18].

Actualmente, los contaminantes más nocivos para la salud humana son el ozono (O_3), el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y los aerosoles atmosféricos (partículas sólidas y/o líquidas que permanecen suspendidas en la atmósfera). Los aerosoles atmosféricos se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios, uno de ellos es en función de su tamaño. De éste modo, se diferencian tres tipos de aerosoles atmosféricos: partículas con diámetro no superior a $10\ \mu m$ (PM_{10}), partículas con diámetro no superior a $2.5\ \mu m$ ($PM_{2.5}$) y partículas con diámetro no superior a la micra (PM_1). Éstas sustancias son responsables de 4.2 millones de muertes cada año en todo el mundo [20], lo que ha llevado a la elaboración de una normativa a nivel europeo que establezca los límites en las concentraciones de cada tipo de contaminante [14, 5].

El presente trabajo se centra en el estudio de los principales gases y partículas contaminantes en el período correspondiente al año 2021, en el entorno urbano de Granada, al sureste de la Península Ibérica, una ciudad de tamaño medio rodeada por montañas de gran altitud, las cuales influyen directamente en la meteorología de toda la zona. Dada la poca presencia de grandes industrias en la zona, la principal fuente de contaminación se asocia al tráfico rodado y las calderas de diésel y biomasa [22, 23]. De éste modo, se realizará un análisis de días altamente contaminantes para asociarlos a diferentes sucesos, como incendios o intrusiones de polvo sahariano, así como la influencia directa con las principales fuentes contaminantes de la ciudad.

Para conseguir el objetivo del presente trabajo, se va a hacer uso de instrumentación perteneciente a la red de vigilancia de la Calidad del Aire de la Junta de Andalucía en dos localizaciones concretas y de sensores de bajo coste pertenecientes a la Red Airly en tres puntos de la ciudad, los cuales se detallan en el apartado 2 de ésta memoria. A la hora de analizar los datos, se deberá tener en cuenta si los niveles de contaminantes en la ciudad de Granada se sitúan por encima de los límites que marca la normativa estatal [19, 13, 17], teniendo en cuenta que la pandemia del COVID-19, la cual trajo consigo numerosas restricciones de movilidad e incluso confinamientos totales de la población, ha ocasionado una disminución de dichos niveles en algunas ciudades, aunque no se produce una disminución en todos ellos [24, 16, 9]. Es por ello que el levantamiento de restricciones de movilidad asociadas a la pandemia del COVID-19 podrá tener efectos en los niveles de contaminantes [21].

Finalmente, se comparará la eficacia de sensores bajo coste empleados en la toma de medidas de los diferentes gases y partículas contaminantes con las obtenidas por la red oficial de la Junta de Andalucía, determinando así su posible utilidad en futuros estudios.

2 Instrumentación y localización experimental.

Los datos que se han manejado provienen de dos fuentes diferentes:

- Red de Vigilancia de la Calidad del Aire de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía [7], la cual posee dos estaciones de medida en la ciudad de Granada situadas en el Palacio de Congresos ($37^{\circ}9'56.2''$ N, $3^{\circ}36'0.2''$ O) y en Granada Norte ($37^{\circ}11'50.8''$ N, $3^{\circ}36'28''$ O).
- Red Airly de sensores inteligentes de bajo coste [2], de la que se han tomado datos de 3 de los 8 sensores distribuidos por la ciudad, situados en el Cuarto Real de Santo Domingo ($37^{\circ}10'18.7''$ N, $3^{\circ}35'44.06''$ O), el Centro Federico García Lorca ($37^{\circ}10'35.6''$ N, $3^{\circ}36'2.29''$ O) y en el CEAMA ($37^{\circ}9'49.8''$ N, $3^{\circ}36'18.2''$ O). Se trata de unos dispositivos que proporcionan medidas en tiempo de real de diferentes gases y partículas de aerosol contaminantes. Para ello, emplea sensores de tipo electroquímico para la medida de gases, mientras que para las partículas de aerosol emplea un contador de partículas láser PMS5003, así como sensores que miden variables meteorológicas. Las especificaciones técnicas de éstos sensores se muestran en la tabla 1 [1].

Tabla 1: Especificaciones técnicas de los sensores de la Red Airly.

Magnitud	Condiciones de funcionamiento	Precisión
Temperatura	−40 °C − +80 °C	±0.2 °C
Humedad	0 − 100 %	±3 %
Presión	700 − 1200 hPa	±1 hPa
PM ₁	0 − 500 μg/m ³	±10 μg/m ³
PM _{2.5}	0 − 1000 μg/m ³	
PM ₁₀		
NO ₂	0 − 5000 ppb	±15 ppb
O ₃		
SO ₂		
CO	0 − 2000 ppb	

La localización de cada una de las estaciones aparece en la Figura 1. En función del entorno, se suele hablar de estaciones de tráfico, para aquellas situadas en las inmediaciones de calles o vías con gran flujo de tráfico, o estaciones de fondo urbano, situadas en zonas donde el tráfico rodado no tiene una influencia considerable[19, 13]. De ése modo, las estaciones de la Red Airly y la de Palacio de Congresos serán estaciones de fondo urbano, mientras que la estación de Granada Norte será una estación de tráfico.



Figura 1: Mapa con las localizaciones de las distintas estaciones de medida.

3 Metodología.

Los datos adquiridos de cada una de las estaciones de medida se corresponden a un año completo de datos: el año 2021. Para las estaciones de la Junta de Andalucía, los datos se presentan a intervalos de 10 minutos, mientras que para la Red Airly se trabaja con datos horarios. Por otro lado, no todas las estaciones obtienen medidas para las mismas variables, de modo que se puede realizar la siguiente clasificación en función de qué tipo de contaminante se mide en cada una de ellas, la cual aparece en la Tabla 2. Además, las variables meteorológicas, a saber, temperatura, humedad y presión, sólo se miden en las estaciones de la Red Airly.

Estación	PM_1	$PM_{2.5}$	PM_{10}	NO_2	O_3	SO_2	CO
CEAMA	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
Santo Domingo	Sí	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí
Centro Lorca	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	No
Granada Norte	No	No	Sí	Sí	No	Sí	Sí
Palacio de Congresos	No	No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Tabla 2: Tabla donde se especifica qué contaminante mide cada una de las estaciones.

El tratamiento estadístico de los datos se ha llevado a cabo mediante una serie de scripts en Python, empleando la librería Pandas, la cual se especializa en el análisis de datos [6], en el que cada estadística se ha obtenido a partir de los datos horarios, ya que existen registros vacíos que no deben tenerse en cuenta en la misma. El hecho de realizarlo así se basa en que al existir registros vacíos, p.e, no se ha registrado ningún valor para la concentración de CO en la estación de Santo domingo para el 10 de febrero a las 11h, el cálculo de la media diaria no va a presentar errores, pero cualquier cálculo que se realice a partir de ésta media no tendrá en cuenta dicho registro vacío. De ese modo, se evitan

errores indirectos a la hora de obtener estadísticas derivadas de otras, ya que todas las estadísticas provienen de los datos en bruto.

Cabe destacar que la estación de Santo Domingo no empieza a registrar datos de PM_{10} hasta el 8 de enero, mientras que la estación de Centro Lorca empieza el 28 de enero, presentando además ciertos días en los que, por problemas del sensor, no se tomaron medidas. El caso de Centro Lorca es de destacar, puesto que, debido a un cortocircuito en el transformador de alimentación del sensor, el dispositivo fue sustituido tres veces a lo largo del año 2021. Éstas faltas de medidas, aunque puedan parecer importantes, no llegan a influir a la hora de obtener las estadísticas, puesto que no se tienen en cuenta a la hora de realizarlas y únicamente serán importantes a la hora de comparar las estadísticas anuales entre estaciones, ya que habrá ciertos días en los que éstas estaciones no presenten datos. Además, para ciertos contaminantes no se tienen datos hasta casi mitad de año, de modo que no se podrán obtener estadísticas estacionales para los mismos.

El graficado de datos se ha llevado a cabo a través de la librería Matplotlib [3], la cual se integra dentro la librería Pandas, de forma que se pueden obtener las gráficas de manera sencilla.

De éste modo, se han obtenido varias estadísticas:

- Estadística anual, con los valores medios, desviaciones estándar, máximos, mínimos, rango intercuartil y coeficiente de variación para los valores de todo el período considerado, teniendo en cuenta que el coeficiente de variación se calcula como:

$$CV = \frac{\mu}{\sigma}$$

siendo μ la media y σ la desviación típica.

- Estadística diaria y mensual, con los valores medios y desviaciones estándar, por días y meses, para todo el período considerado.
- Estadística semanal, en la que se obtienen las medias diarias por día de la semana, es decir, una semana típica para el período considerado.
- Estadística horaria, en la que se obtienen las medias horarias a lo largo de un día, para todo el período considerado, obteniéndose un día típico.
- Estadística estacional, para períodos de tres meses, para estudiar así las variaciones estacionales.

Además, se ha llevado a cabo un test de correlaciones de Pearson para cada conjunto de datos completo de cada una de las estaciones de medida, para el estudio de posibles sinergias.

4 Resultados.

En primer lugar se presenta una estadística para los valores horarios de todas las variables analizadas, tanto en estaciones de la Red Airly (Tabla 3) como en las de la Junta de Andalucía (Tabla 4). Dicha estadística muestra los valores medios, junto a sus desviaciones estándar, así como los mínimos y máximos, la distancia intercuartil y el coeficiente de variación.

Tabla 3: Estadística anual para las estaciones de la Red Airly.

Estación	Variable	$\mu \pm \sigma$	$[min, max]$	$Q_3 - Q_1$	CV %
CEAMA	$PM_1 [\mu g/m^3]$	9.3 ± 9.9	[1, 647]	7	106.1
	$PM_{2.5} [\mu g/m^3]$	12.3 ± 11.3	[1, 650]	9	91.5
	$PM_{10} [\mu g/m^3]$	19.5 ± 17.8	[1, 702]	15	91.4
	$NO_2 [\mu g/m^3]$	27.5 ± 16.5	[1, 186]	19	60.1
	$O_3 [\mu g/m^3]$	42.8 ± 21.2	[1, 122]	30	49.5
	$T [^\circ C]$	17.1 ± 8.6	[-3, 43]	13	50.4
	$P [mbar]$	1019.5 ± 4.3	[1001, 1033]	5	0.4
	$H [\%]$	68.0 ± 17.1	[25, 100]	28	25.1
Santo Domingo	$PM_1 [\mu g/m^3]$	8.9 ± 6.1	[1, 44]	7	67.8
	$PM_{2.5} [\mu g/m^3]$	12.3 ± 8.6	[1, 65]	10	70.1
	$PM_{10} [\mu g/m^3]$	17.6 ± 14.1	[1, 110]	14	80.4
	$SO_2 [\mu g/m^3]$	4.9 ± 2.4	[1, 17]	3	48.1
	$CO [\mu g/m^3]$	356.0 ± 125.2	[119, 3889]	105	35.2
	$T [^\circ C]$	17.3 ± 8.2	[1, 41]	12	47.1
	$P [mbar]$	1022.3 ± 4.2	[1004, 1036]	5	0.4
	$H [\%]$	65.4 ± 19.8	[16, 100]	32	30.3
Centro Lorca	$PM_1 [\mu g/m^3]$	8.4 ± 6.1	[1, 44]	7	72.9
	$PM_{2.5} [\mu g/m^3]$	12.4 ± 9.0	[1, 59]	11	72.1
	$PM_{10} [\mu g/m^3]$	19.4 ± 15.1	[1, 100]	16	77.8
	$NO_2 [\mu g/m^3]$	33.2 ± 12.4	[1, 102]	13	37.2
	$O_3 [\mu g/m^3]$	56.6 ± 25.2	[1, 134]	29	44.6
	$T [^\circ C]$	19.8 ± 8.9	[1, 42]	14	44.7
	$P [mbar]$	1020.2 ± 3.8	[1007, 1034]	5	0.4
	$H [\%]$	62.7 ± 19.9	[17, 100]	33	31.7

Tabla 4: Estadística anual para las estaciones de la Junta de Andalucía.

Estación	Variable	$\mu \pm \sigma$	$[min, max]$	$Q_3 - Q_1$	CV %
Granada Norte	$SO_2 [\mu g/m^3]$	5.1 ± 1.9	[3, 37]	1	37.9
	$PM_{10} [\mu g/m^3]$	28.6 ± 22.3	[5, 288]	20	78.2
	$NO_2 [\mu g/m^3]$	32.2 ± 22.4	[1, 156]	29	69.6
	$CO [\mu g/m^3]$	680.0 ± 270.3	[191, 2575]	371	39.7

Palacio de Congresos	SO_2 [$\mu g/m^3$]	6.9 ± 2.9	[1, 38]	4	42.2
	PM_{10} [$\mu g/m^3$]	23.7 ± 19.9	[1, 358]	18	84.1
	NO_2 [$\mu g/m^3$]	19.8 ± 16.2	[1, 126]	19	81.9
	CO [$\mu g/m^3$]	326.1 ± 199.7	[1, 3010]	299	61.3
	O_3 [$\mu g/m^3$]	53.4 ± 26.8	[1, 146]	36	50.2

Si se comparan los valores de cada una de las variables en las diferentes estaciones se puede observar que, para las variables meteorológicas, los valores medios son muy similares, de modo que la meteorología en las diferentes localizaciones es muy similar, aunque existen discrepancias en cuanto a los valores máximos.

Por otro lado, las partículas en suspensión muestran valores más elevados en las estaciones de la Junta de Andalucía en comparación a las de la Red Airly.

La concentración media de NO_2 es similar en las estaciones de Centro Lorca (33.2 ± 12.4) $\mu g/m^3$ y Granada Norte (32.2 ± 22.4) $\mu g/m^3$, lo cual indica que en Centro Lorca debe existir una fuente de dicho contaminante diferente al tráfico rodado, que es la fuente principal de contaminantes en la estación de Granada Norte. Para CEAMA y Palacio de Congresos se registran valores inferiores, de (27.5 ± 16.5) $\mu g/m^3$ y (19.8 ± 16.2) $\mu g/m^3$, respectivamente.

Los valores de O_3 son similares en Palacio de Congresos (53.4 ± 26.8) $\mu g/m^3$ y Centro Lorca (56.6 ± 25.2) $\mu g/m^3$, mientras que en CEAMA es algo inferior, de (42.8 ± 21.2) $\mu g/m^3$.

Las concentraciones medias anuales de CO resultan muy similares en Santo Domingo (356.0 ± 125.2) $\mu g/m^3$ y Palacio de Congresos (326.1 ± 199.7) $\mu g/m^3$ mientras que en Granada Norte resulta muy superior, de (680.0 ± 270.3) $\mu g/m^3$, debido a la influencia del tráfico rodado.

Ésta similitud entre valores medios para estaciones de diferentes fuentes indica que los sensores de bajo coste empleados en la Red Airly poseen cierta eficacia en las medidas, ya que la estadística obtenida presenta parámetros muy similares, cuyas diferencias bien podrían asociarse a las diferentes localizaciones entre estaciones y no tanto al sensor como tal.

4.1 Sinergia entre las diferentes variables.

Se ha llevado a cabo un estudio de sinergias entre las diferentes variables, para cada estación de medida, mediante un test de correlación de Pearson, cuyos valores se muestran en las Tablas 5, 6, y 7, para la Red Airly, y Tablas 8 y 9. De ese modo, se pretende analizar si la acción de ciertas variables tiene influencia sobre otras.

Tabla 5: Correlaciones entre las variables de la estación de CEAMA.

	PM_1	$PM_{2.5}$	PM_{10}	NO_2	O_3	T	P	H
PM_1	1.00	0.98	0.87	0.03	-0.16	-0.17	0.11	0.13
$PM_{2.5}$		1.00	0.94	0.08	-0.23	-0.14	0.12	0.12
PM_{10}			1.00	0.15	-0.30	-0.12	0.15	0.12
NO_2				1.00	-0.07	0.60	0.02	-0.51
O_3					1.00	0.25	-0.27	-0.26
T						1.00	-0.18	-0.74
P							1.00	0.03
H								1.00

Tabla 6: Correlaciones entre las variables de la estación de Santo Domingo.

	PM_1	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	T	P	H
PM_1	1.00	0.99	0.95	0.29	0.46	-0.01	0.17	0.05
$PM_{2.5}$		1.00	0.96	0.29	0.47	-0.01	0.17	0.04
PM_{10}			1.00	0.32	0.49	-0.01	0.18	0.05
SO_2				1.00	0.47	-0.18	0.25	0.23
CO					1.00	-0.05	0.19	-0.01
T						1.00	-0.25	-0.75
P							1.00	0.08
H								1.00

Tabla 7: Correlaciones entre las variables de la estación de Centro Lorca.

	PM_1	$PM_{2.5}$	PM_{10}	NO_2	O_3	T	P	H
PM_1	1.00	0.98	0.94	0.16	-0.02	0.02	0.04	0.05
$PM_{2.5}$		1.00	0.97	0.17	-0.04	0.04	0.04	0.04
PM_{10}			1.00	0.20	-0.07	0.01	0.05	0.06
NO_2				1.00	-0.31	-0.30	0.08	0.16
O_3					1.00	0.79	-0.31	-0.65
T						1.00	-0.40	-0.83
P							1.00	0.27
H								1.00

La alta correlación entre los diferentes tipos de partículas en la Red Airly es evidente, dado que las $PM_{2.5}$ abarcan a las PM_1 y las PM_{10} las abarca a las dos, de modo que no es

de extrañar su alta correlación, superior a 0.9. Por otro lado, se encuentra cierta correlación entre el CO y las PM_X , la cual es superior a 0.4, aunque sólo se encuentra en las estaciones de las Red Airly.

Por otro lado, se observa gran correlación, superior a -0.7 , entre temperatura y humedad, lo cual indica que éstos sensores toman medidas correctas de éstas variables meteorológicas, ya que, habitualmente, el incremento de temperatura hace que la humedad disminuya, y viceversa.

Tabla 8: Correlaciones entre las variables de la estación de Granada Norte.

	PM_{10}	NO_2	CO	SO_2
PM_{10}	1.00	0.27	0.08	0.18
NO_2		1.00	0.51	0.35
CO			1.00	0.28
SO_2				1.00

Tabla 9: Correlaciones entre las variables de la estación de Palacio de Congresos.

	PM_{10}	NO_2	CO	SO_2	O_3
PM_{10}	1.00	0.22	0.20	0.13	0.04
NO_2		1.00	0.33	0.10	-0.61
CO			1.00	0.24	-0.20
SO_2				1.00	0.06
O_3					1.00

En las estaciones de la Red de la Junta de Andalucía se observan claras correlaciones entre CO y NO_2 , de 0.51 en Granada Norte y O_3 y NO_2 , de -0.61 en Palacio de Congresos. Éstas correlaciones pueden explicarse atendiendo al origen de cada contaminante, que, principalmente, suele ser los escapes de los motores de combustión de vehículos. Dado que Granada Norte se clasifica como estación de tráfico, es de esperar que las correlaciones sean más fuertes, ya que habrá mayor concentración de contaminantes y las influencias entre los mismos serán más fuertes.

La existencia de éstas correlaciones puede, por tanto, indicar la existencia de patrones similares para los diferentes contaminantes, lo cual se estudiará a continuación.

4.2 Análisis de la evolución diaria y mensual.

Las Figuras 2 y 3 muestran los valores promedio diarios, obtenidos a partir de los valores horarios para PM_{10} para las estaciones de la Red Airly y para las estaciones de la Junta de Andalucía, respectivamente. Asimismo, se muestran los valores promedio mensuales junto con su desviación estándar.

En primer lugar, observamos cómo a partir del fin del Estado de Alarma, el 21 de junio, los niveles de partículas aumentan progresivamente mes a mes. Por otro lado, se observan varios picos, los cuales se pueden relacionar con episodios de intrusión de polvo sahariano o incendios.

Por otro lado, el mes de máxima concentración de PM_{10} para las estaciones de CEAMA (28.8 \pm 23.1) $\mu g/m^3$, Santo Domingo (25.8 \pm 19.6) $\mu g/m^3$ y Granada Norte (37.3 \pm 36.1) $\mu g/m^3$ es diciembre, mientras que para Centro Lorca (25.4 \pm 12.0) $\mu g/m^3$ y Palacio de Congresos (31.1 \pm 18.9) $\mu g/m^3$ es agosto, siendo ambos meses característicos por grandes desplazamientos ocasionados por festividades (navidad y verano, respectivamente) y posteriores al fin del estado de alarma. El mes de menor concentración para CEAMA (11.0 \pm 8.8) $\mu g/m^3$ y Santo Domingo (11.1 \pm 7.4) $\mu g/m^3$ es mayo, para Centro Lorca (10.7 \pm 8.8) $\mu g/m^3$ es febrero y para Granada Norte (20.2 \pm 14.5) $\mu g/m^3$ y Palacio de Congresos (16.9 \pm 12.1) $\mu g/m^3$ es abril, siendo todos ellos meses previos al fin del estado de alarma.

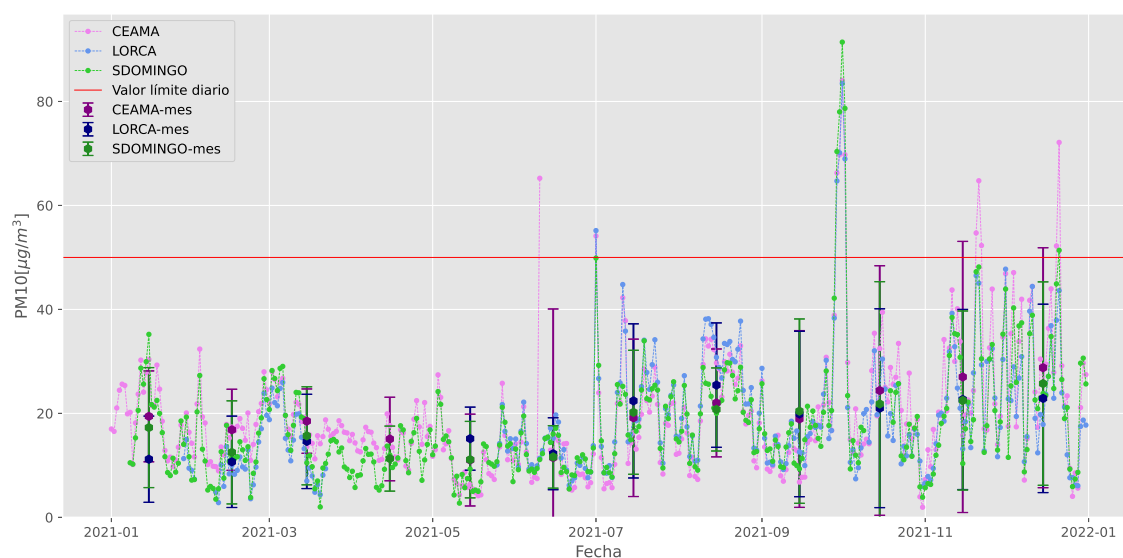


Figura 2: Serie anual para PM_{10} en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la Red Airly. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.

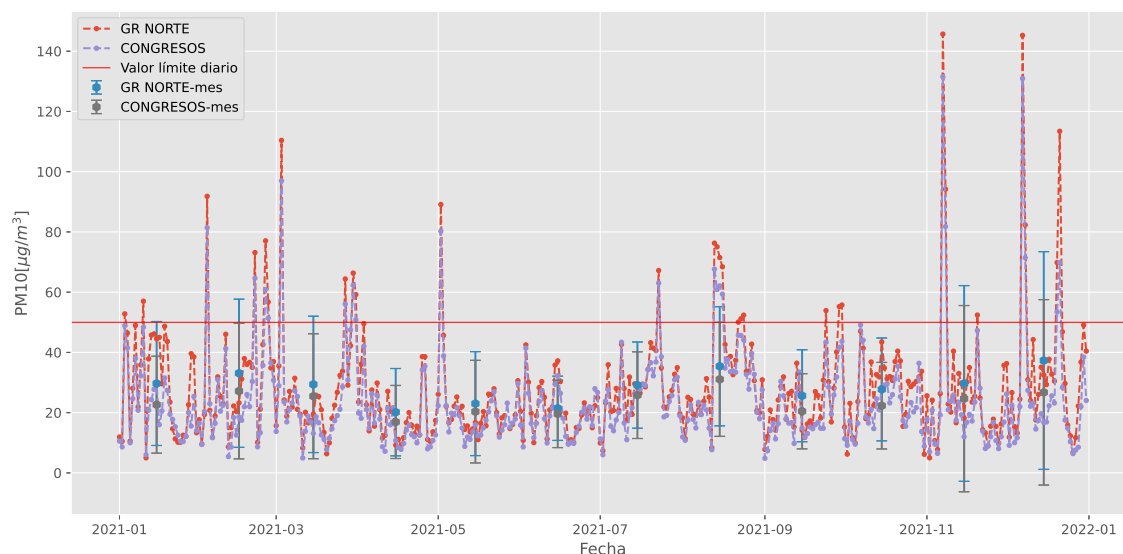


Figura 3: Serie anual para PM_{10} en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la red de la Junta de Andalucía. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.

Las Figuras 4 y 5 muestran el mismo análisis realizado para las PM_{10} pero en éste caso para el NO_2 , para las estaciones de la red Airly y las de la Junta de Andalucía, respectivamente.

En primer lugar, destacar que en la estación de Centro Lorca sólo se tiene datos disponibles a partir del mes de mayo, aunque para el resto del período de datos si se observa la tendencia habitual de concentraciones de NO_2 , que suele ser mayor en los meses de invierno que en los meses de verano.

En la estación de CEAMA se observa una tendencia inusual, lo cual ha podido ser consecuencia de un error en el sensor encargado de tomar las medidas, ya que para Centro Lorca, aunque no existen datos para el período completo, si se observa dicha tendencia. En cuanto a las estaciones de la Junta de Andalucía, se observa un comportamiento habitual [8, 19], observándose además cierto aumento de concentraciones tras el final del estado de alarma.

Por otro lado, se ha obtenido que el mes de máxima concentración de NO_2 para CEAMA (39.4 ± 20.7) $\mu g/m^3$ es julio, para Centro Lorca (41.0 ± 12.6) $\mu g/m^3$ es noviembre y para Granada Norte (45.1 ± 26.9) $\mu g/m^3$ y Palacio de Congresos (29.4 ± 21.2) $\mu g/m^3$ es diciembre, lo cual, excepto para CEAMA por lo comentado anteriormente, coinciden con los meses habituales de máximas concentraciones de NO_2 . Éstos meses son también los que suelen tener una menor radiación solar media, lo que hace que se degrade menor cantidad de NO_2 a ozono mediante reacciones fotoquímicas. De hecho, el mes de mínima concentración de ozono en CEAMA (33.8 ± 17.4) $\mu g/m^3$ es octubre, para Centro Lorca (37.2 ± 20.4) $\mu g/m^3$ es noviembre y para Palacio de Congresos (37.0 ± 26.3) $\mu g/m^3$ es diciembre. Por tanto, los meses de máxima concentración de NO_2 coinciden con los de mínima concentración de O_3 , para cada estación de medida excepto CEAMA, en la que, como ya se ha comentado, hubo un problema en las medidas.

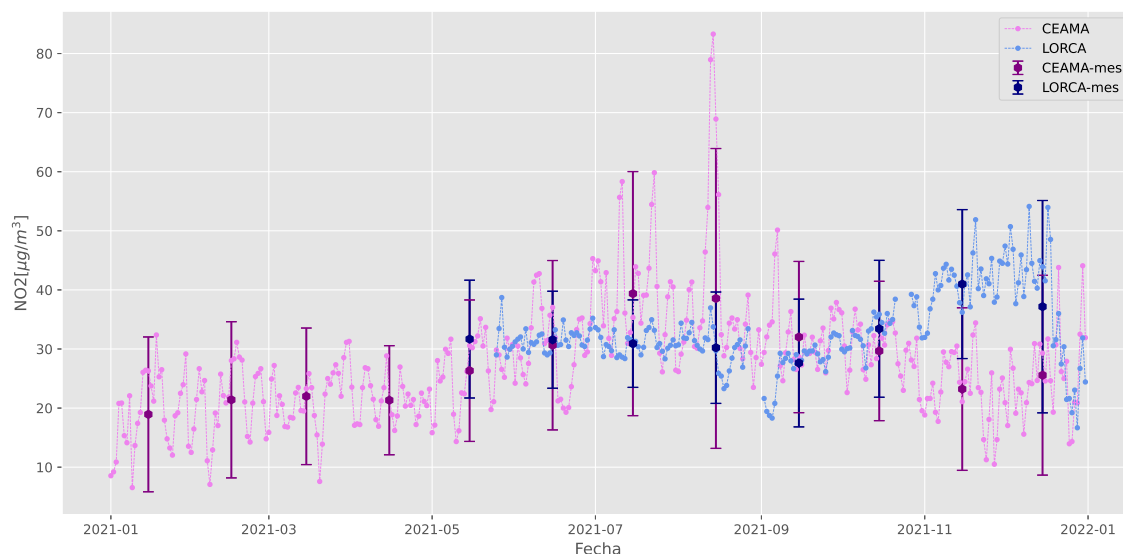


Figura 4: Serie anual para NO_2 en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la Red Airly. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.

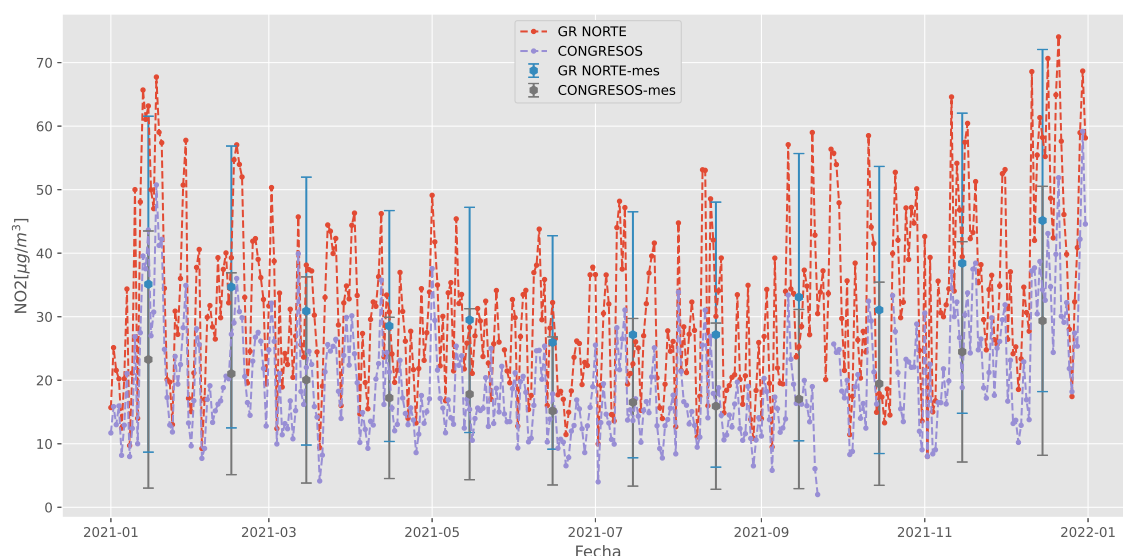


Figura 5: Serie anual para NO_2 en la que se muestran los valores medios diarios junto a las medias mensuales para la red de la Junta de Andalucía. Las barras de error se corresponden con las desviaciones típicas para cada mes.

Del mismo modo, se ha obtenido que el mes de mínima concentración de NO_2 en CEAMA (18.9 ± 13.1) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es enero, para Centro Lorca (27.6 ± 10.8) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es septiembre y para Granada Norte (26.0 ± 16.8) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y Palacio de Congresos (15.2 ± 11.7) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es junio, coincidiendo (excepto de CEAMA por problemas de medida) con los meses de máxima concentración de O_3 , que para CEAMA (51.8 ± 19.9) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es junio, para Centro Lorca (70.8 ± 33.7) $\mu\text{g}/\text{m}^3$ es septiembre y para Palacio de Congresos (65.2 ± 27.2) $\mu\text{g}/\text{m}^3$

es julio. Cabe destacar que las concentraciones máximas y mínimas de NO_2 en Centro Lorca son similares a las de Granada Norte, lo cual indica la existencia de una fuente de emisión de NO_2 en Centro Lorca, la cual no es el tráfico rodado, ya que ésta estación se clasifica como estación de fondo urbano.

En lo que respecta a las intrusiones de polvo sahariano, el MITECO elabora un informe anual por regiones en el que se indican los días en los que una masa de polvo sahariano puede afectar a los niveles medidos [4]. Granada se sitúa en la región sureste de la Península Ibérica, para la cual se tiene los episodios de intrusiones mostrados en la Tabla 10:

Tabla 10: Días de episodios de intrusión de polvo sahariano.
Fuente: MITECO [4].

Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Diciembre
4-5 17-20 24-28	1-9 26-31	1-6 8-10 24-26	3-9 22 26-31	1-6 8-19 27	1-2 9-12 16-17 20-25 28-30	9-18 20-28	1 3-5 7-8 12-17 23-30	13 16-17 20 29	20-23

De éste modo, señalando éstos episodios en las gráficas anteriores, se puede comprobar si existe o no una influencia directa de las masas de aire sahariano con el aumento de la concentración de partículas, tal y como se muestra en las Figuras 6 y 7, para la Red Airly y la Junta de Andalucía, respectivamente. Puede observarse que sólo existe una influencia directa en ciertos episodios largos de intrusión, los cuales debieron de ser de alta intensidad. Para episodios cortos, de hasta dos días de duración, no se observa una influencia significativa. Éstos casos pueden corresponder con intrusiones de polvo sahariano a niveles altos de la atmósfera, los cuales no afectan a las medidas en superficie de PM_{10} .

Por otro lado, cabe destacar la mayor sensibilidad de los sensores de las estaciones de la Junta de Andalucía, al menos en cuanto a los correspondientes a PM_{10} , ya que muestran medidas ligeramente mayores que los de la Red Airly durante los episodios de intrusión, lo cual pone de manifiesto la mayor eficacia de los sensores de la Junta de Andalucía frente a los de bajo coste de la Red Airly.

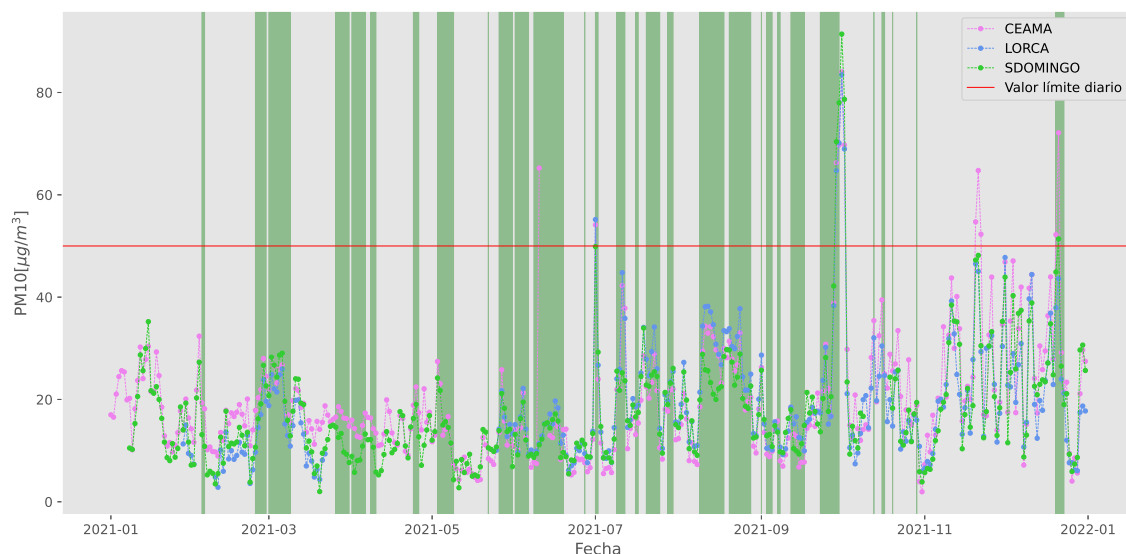


Figura 6: Superposición de intrusiones de polvo sahariano a las concentraciones diarias de PM_{10} para la red Airly. Las franjas verdes indican los períodos de intrusión.

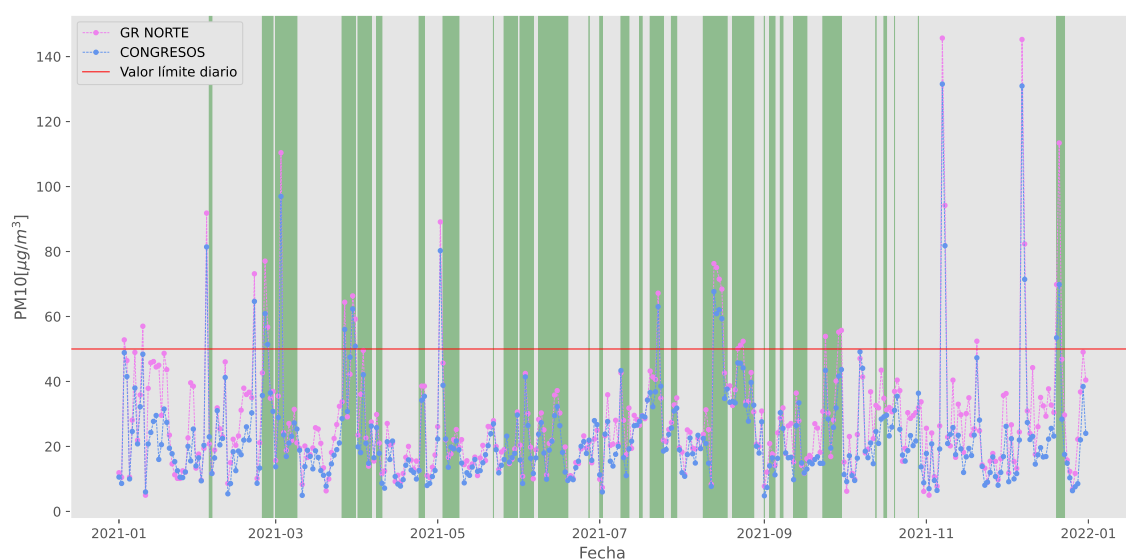


Figura 7: Superposición de intrusiones de polvo sahariano a las concentraciones diarias de PM_{10} para la red de la Junta de Andalucía. Las franjas verdes indican los períodos de intrusión.

Cabe destacar también el pico de concentraciones alcanzado el 1 de julio en las estaciones de la Red Airly, con $(54.1 \pm 34.4) \mu g/m^3$ en CEAMA, $(55.2 \pm 27.4) \mu g/m^3$ en Centro Lorca y $(49.9 \pm 23.9) \mu g/m^3$ en Santo Domingo, que puede ser atribuido al incendio que tuvo lugar en una fábrica de jamones en la localidad de Ojijares, el cual produjo una gran nube de humo que cubrió el área metropolitana en su totalidad. Las estaciones de la Junta de Andalucía no registran dicho pico, teniéndose una media de $(9.9 \pm 4.1) \mu g/m^3$ en Granada Norte y $(11.3 \pm 5.8) \mu g/m^3$ en Palacio de Congresos.

Los picos registrados durante los meses de noviembre y diciembre no pueden asociarse, a priori, a causas naturales, de modo que deben tener un origen antropogénico, como la influencia del tráfico rodado, que pudo ser superior en dichos días, obras cercanas a las estaciones de medida, las cuales pueden provocar polvo que altere los registros, o incluso las quemadas de biomasa que tienen lugar en los cultivos de la vega de Granada que, unidas a vientos en dirección a la ciudad, pueden provocar un aumento de las partículas en suspensión.

4.3 Análisis de la evolución horaria.

Para estudiar la existencia de un patrón horario, se ha calculado la media horaria de cada contaminante para todo el período de datos. A modo de ejemplo, se muestran los patrones horarios de concentraciones de PM_{10} tanto para las estaciones de la Red Airly (Figura 8) como para las de la Junta de Andalucía (Figura 9).

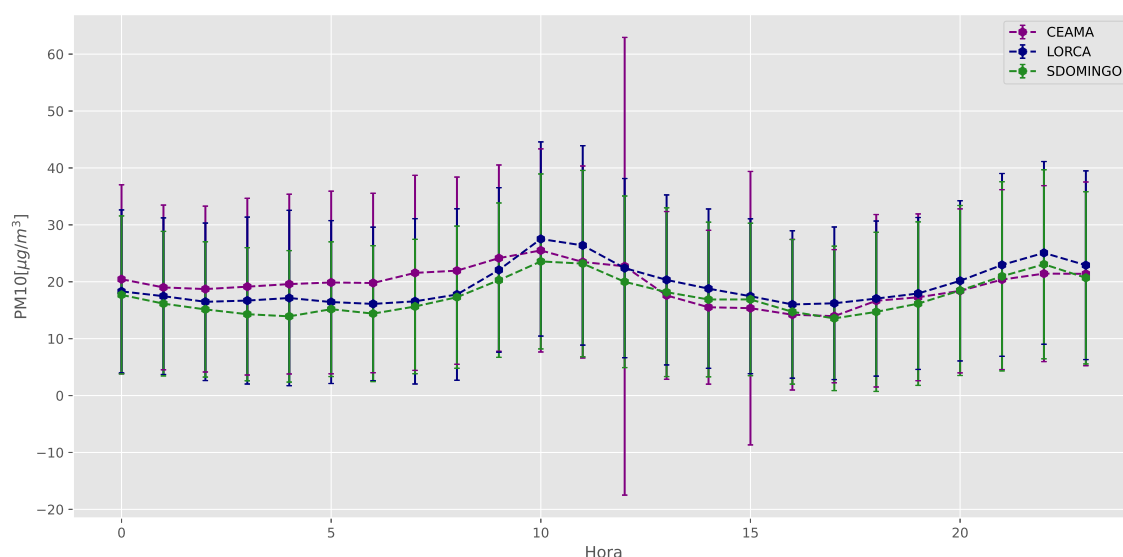


Figura 8: Valores medios horarios de concentración de PM_{10} junto con las desviaciones estándar para la Red Airly, obtenidos como la media anual para un intervalo horario concreto.

Puede observarse el aumento de la concentración de PM_{10} a partir de las 6-7h de la mañana, cuando se tienen en torno a los $15 - 20 \mu g/m^3$ para Red Airly y Palacio de Congresos y $25 \mu g/m^3$ en Granada Norte, que se hace máximo a las 10-11h, en torno a los $25 \mu g/m^3$ para la Red Airly y Palacio de Congresos y $35 \mu g/m^3$ en Granada Norte, con un pequeño descenso en las horas de la tarde, en torno a las 15-19h, con un mínimo a las 17h en torno a los $15 \mu g/m^3$ para la Red Airly y $25 \mu g/m^3$ para la Red de la Junta de Andalucía, al que le sigue un repunte hacia las 20h que alcanza su máximo a las 23h, en torno a los $22 \mu g/m^3$ para la Red Airly y Palacio de Congresos y $30 \mu g/m^3$ para Granada Norte. Éste patrón, que resulta más acentuado en la estación de Granada Norte, es consecuencia directa del tráfico rodado, ya que las horas de máxima concentración se encuentran tras las horas punta de tráfico rodado (sobre las 8-9h y 20-21h).

El patrón observado en la concentración media horaria de PM_{10} también puede obser-

varse en PM_{10} , para la Red Airly, con dos mínimos en torno a $8 - 10 \mu g/m^3$ y dos máximos en torno a $10 - 12 \mu g/m^3$; $PM_{2.5}$, con dos mínimos en torno a $10 \mu g/m^3$ y dos máximos en torno a los $15 \mu g/m^3$.

Un análisis similar se ha realizado para los gases contaminantes, aunque no se muestran las gráficas, excepto para el NO_2 , observándose el mismo patrón que el mostrado en las partículas de aerosol para el CO, con dos mínimos en torno a $280 \mu g/m^3$ en Santo Domingo y Palacio de Congresos y $600 \mu g/m^3$ en Granada Norte y dos máximos en torno a los $400 \mu g/m^3$ en Palacio de Congresos, $430 \mu g/m^3$ en Santo Domingo y $800 \mu g/m^3$ en Granada Norte; teniéndose que los mínimos se dan en sobre las 3-5h y las 15-19h y los máximos sobre las 9-11h y las 20-23h, tal y como sucede con las PM_{10} . La similitud de éstos patrones refleja la correlación existente entre éstas variables, la cual se ha estudiado anteriormente.

Para el SO_2 se observan patrones muy planos, los cuales oscilan entre 5 y $7 \mu g/m^3$, los cuales son similares a los anteriores, aunque con máximos y mínimos muy poco destacables. Únicamente se aprecia una oscilación significativa en la estación de Santo Domingo, la cual presentan un máximo sobre las 8-9h de la mañana, en torno a los $6 \mu g/m^3$, y un mínimo sobre las 16h, en torno a los $3 \mu g/m^3$. De nuevo, se observa la influencia directa del tráfico rodado sobre la estación de Granada Norte, la cual presenta valores muy superiores en algunos casos, como el CO, que el resto de estaciones de medida.

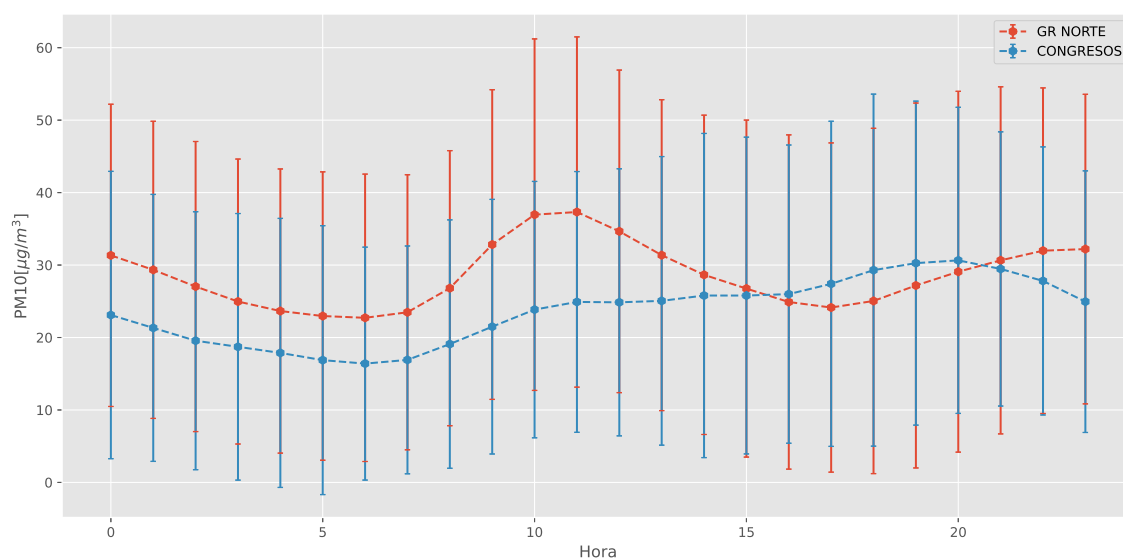


Figura 9: Valores medios horarios de concentración de PM_{10} junto con las desviaciones estándar para la red de la Junta de Andalucía, obtenidos como la media anual para un intervalo horario concreto.

Para otros contaminantes como el NO_2 , cuya evolución horaria se muestra en la Figura 10 para la Red Airly y en la Figura 11 para la Junta de Andalucía, el patrón presenta diferencias entre las dos fuentes de datos. Para la Red de la Junta de Andalucía se observan dos mínimos sobre las 3-5h y las 15-19h, en torno a $10 \mu g/m^3$ en Palacio de Congresos y $20 \mu g/m^3$ en Granada Norte, y dos máximos sobre las 8-9h y 20-22h, en torno a $30 \mu g/m^3$ en Palacio de Congresos y $50 \mu g/m^3$ en Granada Norte. En las estaciones de la Red Airly el patrón observado es diferente: para la estación de CEAMA se encuentran similitudes

con el patrón observado hasta ahora en la Red de la Junta de Andalucía, con dos mínimos sobre las 3-5h y 11-13h, el primero de ellos en torno a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el segundo en $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y dos máximos sobre las 6-9h y las 17-20h, el primero en torno a $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el segundo en $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, en Centro Lorca, la concentración se mantiene durante las primeras horas de la madrugada casi constante, pudiéndose distinguir un pequeño mínimo sobre las 5h, en torno a los $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y otro sobre las 10h de menor valor, en torno a los $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$; además de dos máximos, uno de ellos sobre las 7h, en torno a los $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y el otro sobre las 18-19h, en torno a los $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Éstas elevadas concentraciones en horas tan tempranas, las cuales son equiparables a las registradas en las estación de Granada Norte, pueden tener origen en las calderas de combustión de la zona, ya que el tráfico rodado en la localización del sensor, la Plaza de la Romanilla, es muy bajo, mientras que en dicha zona existe una alta concentración de hoteles y apartamentos turísticos, la mayoría de los cuales posee dichas calderas. También podría haber cierta influencia de las extracciones de los locales de hostelería y restauración, la cual se manifiesta también en las concentraciones de PM_{10} , ligeramente superiores en Centro Lorca a partir de las 10 de la mañana, la hora habitual a la que empiezan a funcionar éstos negocios en los que se produce una gran cantidad de combustión de biomasa.

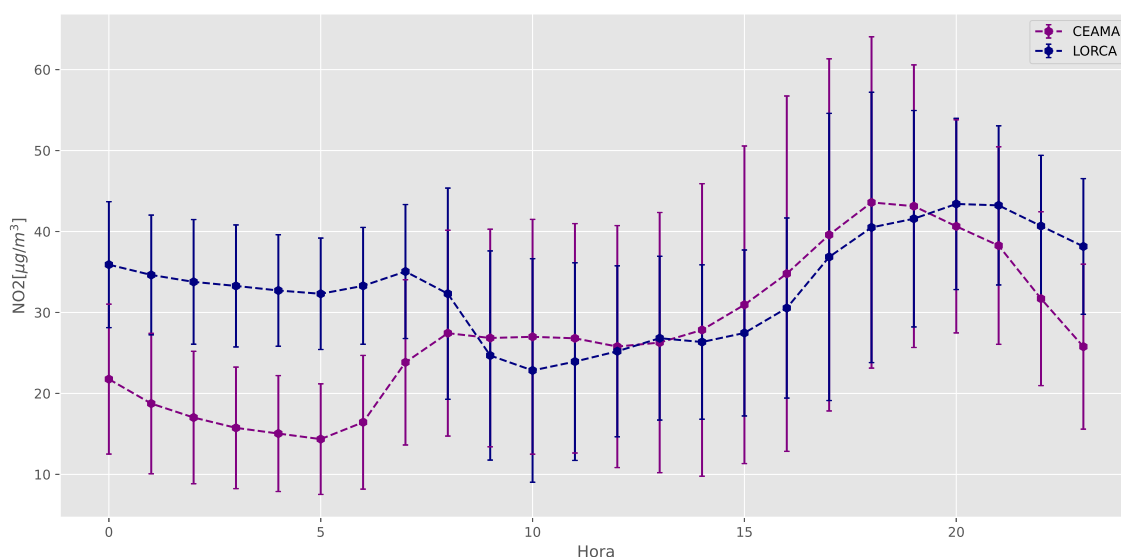


Figura 10: Valores horarios medios de concentración de NO_2 junto con las desviaciones estándar para la Red Airly.

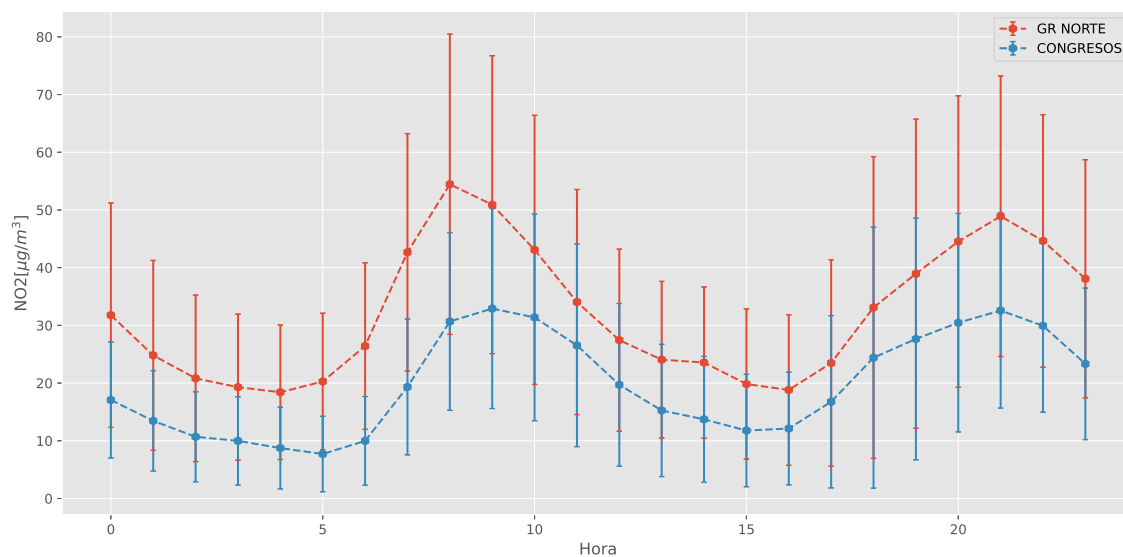


Figura 11: Valores horarios medios de concentración de NO_2 junto con las desviaciones estándar para la red de la Junta de Andalucía.

Para el ozono se observa otro patrón diferente, mostrado en la Figura 12 para la Red Airly y la Figura 13 para la Junta de Andalucía, ya que su formación se produce a partir de reacciones fotoquímicas del NO_2 , por lo que se favorecerá su formación en las horas de mayor radiación solar [15, 12]. De ese modo, a primeras horas de la mañana, sobre las 7-10h, cuando los niveles de NO_2 aumentan, la concentración de O_3 es mínima, en torno a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CEAMA, $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Centro Lorca y Granada Norte, y va aumentando conforme avanza la mañana, ya que aumenta la radiación solar y parte del NO_2 se degrada a O_3 , teniéndose el máximo de concentraciones sobre las 15h, en torno a los $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en Centro Lorca y Granada Norte y $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en CEAMA. Dado que existe una mayor concentración de NO_2 en Centro Lorca, también existirá una mayor concentración de O_3 , ya que éste último se forma a partir de la degradación del primero. Además, en áreas con elevados niveles de hidrocarburos en la atmósfera se produce la reacción de conversión del NO en NO_2 sin consumo de O_3 , por formación de un radical libre que ataca al NO . De este modo, la concentración de ozono aumenta por encima de sus niveles naturales. La formación de O_3 a partir de NO_2 se favorece por la presencia de derivados hidrocarburos. Por ello, resulta coherente que la estación de Centro Lorca muestre mayores concentraciones de O_3 que CEAMA, ya que sucedía lo mismo con las concentraciones de NO_2 .

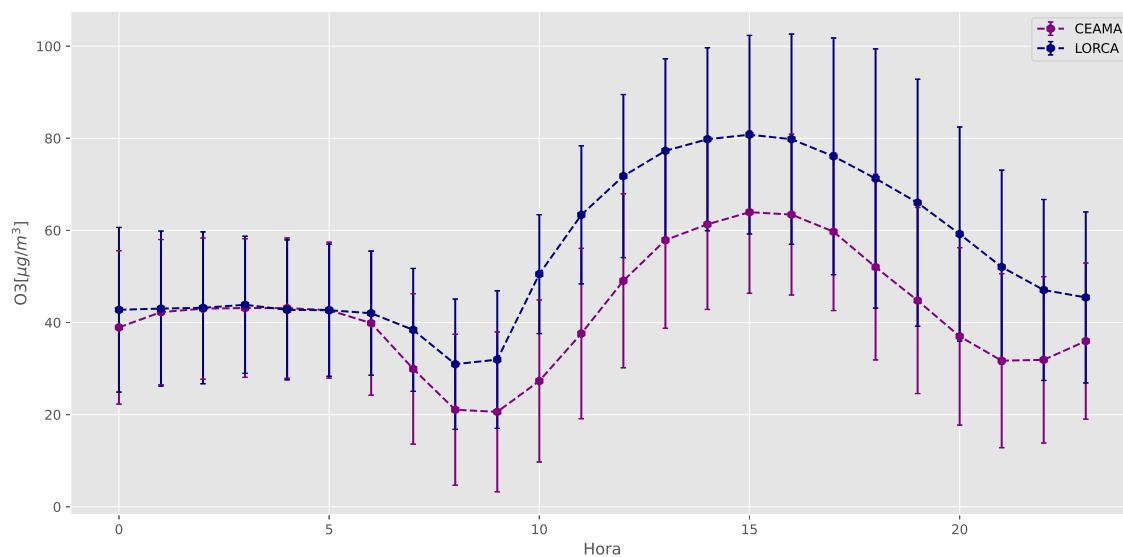


Figura 12: Valores medios horarios de concentración de O_3 junto con las desviaciones estándar para la Red Airly.

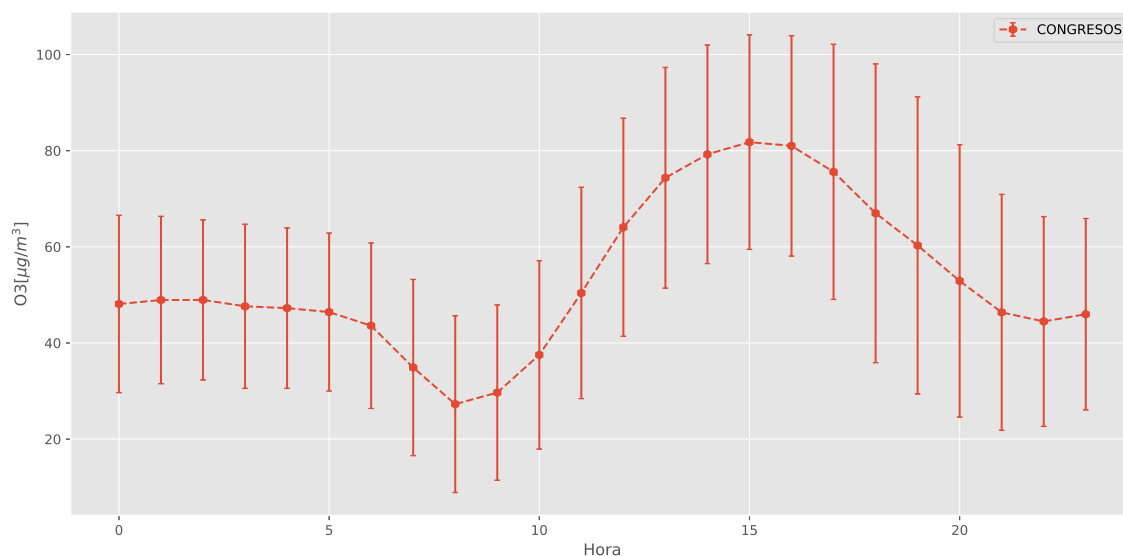


Figura 13: Valores medios horarios de concentración de O_3 junto con las desviaciones estándar para la red de la Junta de Andalucía.

4.4 Análisis de la evolución semanal.

Se ha realizado también un análisis estadístico según el día de la semana, en el que se obtienen los patrones de concentraciones, por contaminante y estación, en función del día de la semana. De nuevo, a modo de ejemplo, se presentan los resultados obtenidos para las PM_{10} para la Red Airly (Figura 14) y la Junta de Andalucía (Figura 15).

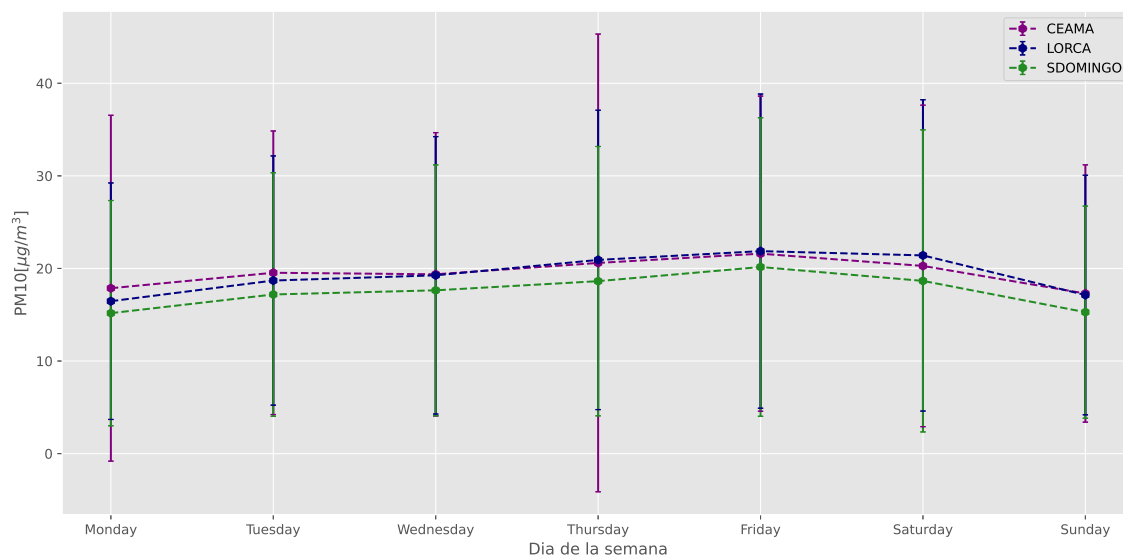


Figura 14: Valores medios según el día de la semana, a partir de los valores medios anuales para un día de la semana en concreto, junto con las correspondientes desviaciones estándar, para la Red Airly.

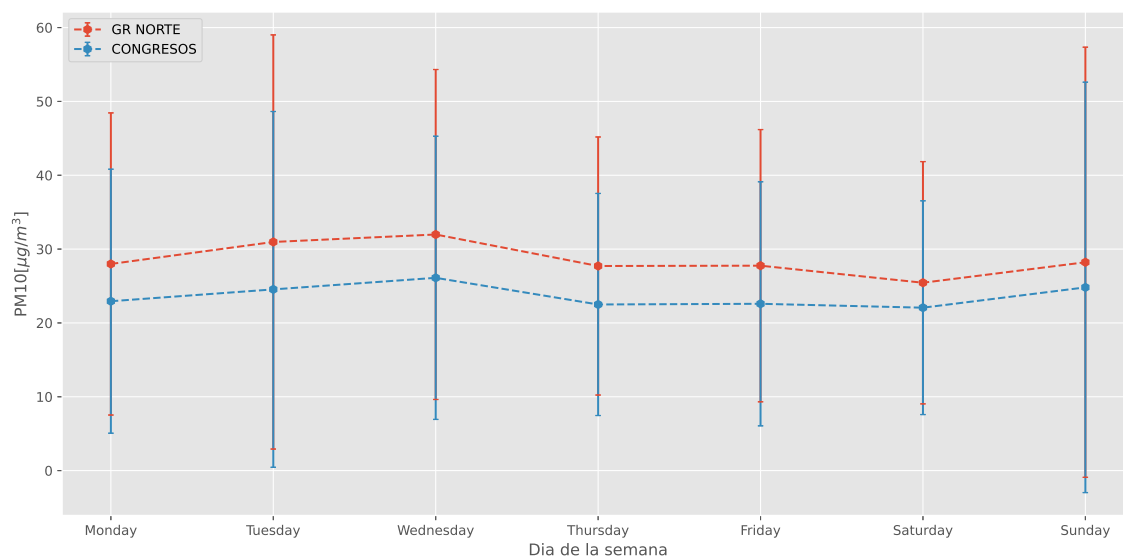


Figura 15: Valores medios según el día de la semana, a partir de los valores medios anuales para un día de la semana en concreto, junto con las correspondientes desviaciones estándar, para la red de la Junta de Andalucía.

El patrón de PM_{10} en las estaciones de la Red Airly muestra un máximo de la concentración el viernes, en torno a los $20 \mu g/m^3$. Éste comportamiento también se observa para PM_1 (en torno a $10 \mu g/m^3$), $PM_{2.5}$ (unos $14 \mu g/m^3$), NO_2 (unos $30 \mu g/m^3$ en CEAMA y $34 \mu g/m^3$ en Centro Lorca) y CO (en torno a $375 \mu g/m^3$). Éstos máximos coinciden con uno de los días de la semana en los que suele haber mayor cantidad de tráfico rodado, debido al fin de semana.

En el caso de las estaciones de la Junta de Andalucía, el patrón observado para los contaminantes anteriores es diferente, teniéndose las máximas concentraciones los días laborales, siendo la estación de Granada Norte la que registra los valores más altos (máximo el miércoles, para PM_{10} de $32 \mu g/m^3$, NO_2 de $35 \mu g/m^3$, y máximo el martes para CO de $737 \mu g/m^3$). El comportamiento ahora puede explicarse teniendo en cuenta que cerca de ellas existe una gran concentración de lugares de trabajo, lo que provocará un mayor flujo de tráfico en días laborales. Además, la estación de Palacio de Congresos se encuentra cerca del Intercambiador Sur de transportes, el cual tiene un mayor número de líneas de autobuses en los días laborales. Por tanto, se concluye que existe una relación directa entre el flujo de tráfico y la concentración de PM_{10} , CO y NO_2 , lo que resulta plausible debido a que éstos contaminantes tienen su origen en los escapes de los motores de combustión.

Para el O_3 se observa un patrón bastante plano, como se observa en la Figura 16, para la Red Airly, y en la Figura 17, para la Junta de Andalucía, con un ligero aumento de la concentración en los sábados, la cual alcanza los $55 \mu g/m^3$ en Palacio de Congresos, $58 \mu g/m^3$ en Centro Lorca y $47 \mu g/m^3$ en CEAMA. Dicho aumento tiene origen en la degradación del NO_2 , entre otros, ya que, como se ha comentado anteriormente, el pico de concentración semanal de NO_2 tiene lugar los viernes.

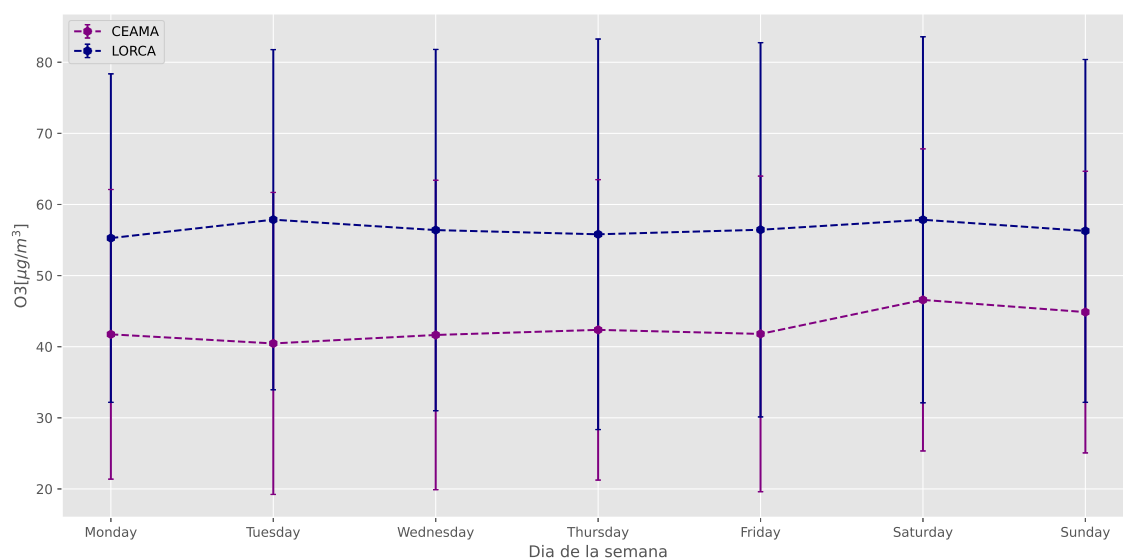


Figura 16: Concentraciones medias de O_3 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la Red Airly.

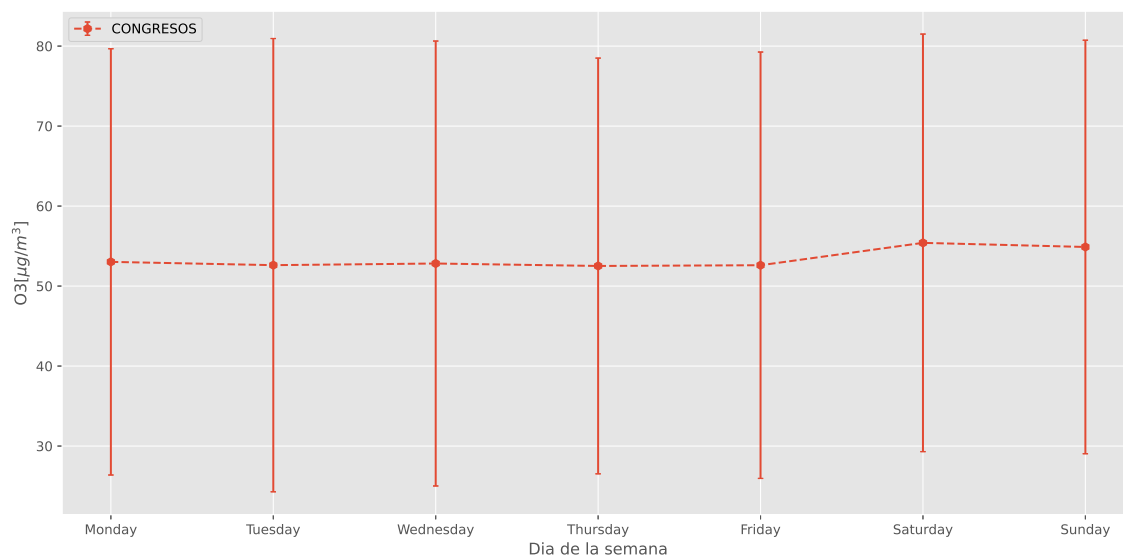


Figura 17: Concentraciones medias de O_3 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la red de la Junta de Andalucía.

Los patrones semanales de SO_2 , los cuales se muestran en las Figuras 18 y 19, para la Red Airly y la Junta de Andalucía, respectivamente, presentan un mínimo los sábados en torno a $4.6 \mu g/m^3$ en Santo Domingo, $5 \mu g/m^3$ en Granada Norte y $6.8 \mu g/m^3$ en Palacio de Congresos; ya que, sabiendo que éste contaminante tiene su origen en la actividad industrial, lo esperable es una disminución de su concentración al llegar el fin de semana. Además, se hace evidente la poca actividad industrial que posee Granada, debido a la baja concentración, en media, observada para el SO_2 .

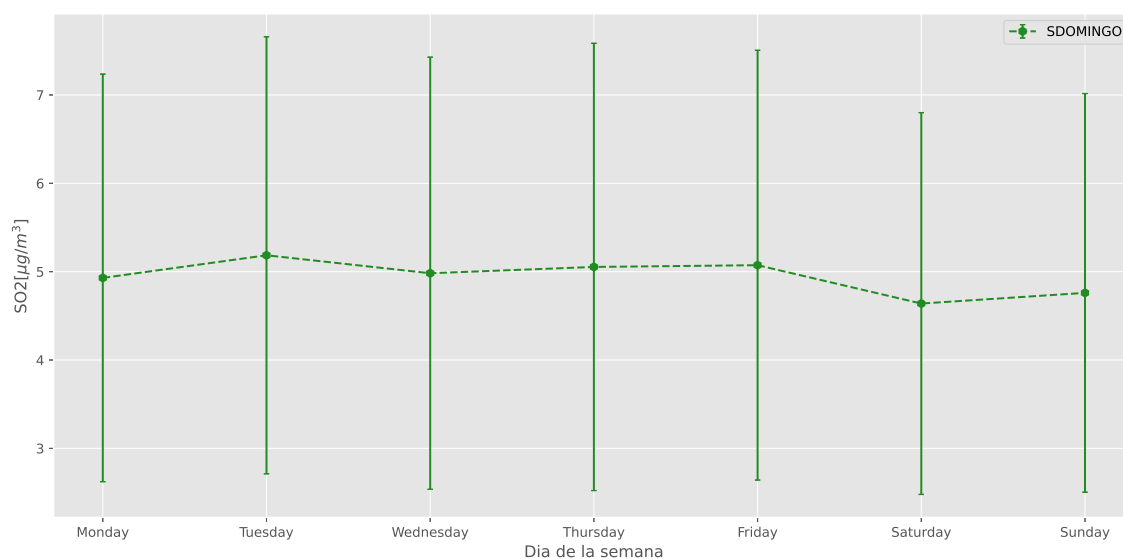


Figura 18: Concentraciones medias de SO_2 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la red de la Red Airly.

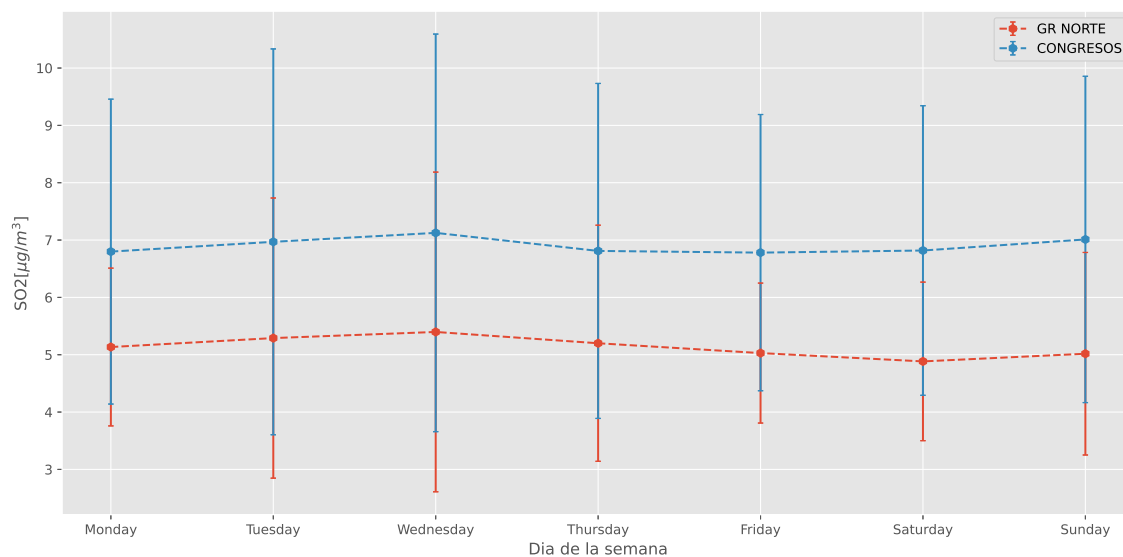


Figura 19: Concentraciones medias de SO_2 junto con las desviaciones estándar, según el día de la semana, para la red de la red de la Junta de Andalucía.

4.5 Análisis de la evolución estacional.

Para estudiar si existe un patrón estacional, se han separado los datos por estaciones siendo invierno el período comprendido entre el 1 de enero y el 31 de marzo, primavera del 1 de abril al 30 de junio, verano del 1 de julio al 30 de septiembre y otoño del 1 de octubre al 31 de diciembre. En éste caso, se ha fijado un contaminante y se han tomado todas la estaciones para las que se tienen medidas del mismo, sin distinguir entre la Red Airly y la red de la Junta de Andalucía, para que sea más sencillo realizar comparaciones entre ambas. La Figura 20 muestra un análisis por estaciones del año para PM_{10} , para todas las estaciones usadas en éste trabajo.

Para las PM_{10} se observa una disminución para el período de primavera, coincidente con el final del estado de alarma. En los períodos de verano y otoño los valores aumentan, ya que al eliminarse las restricciones asociadas a la pandemia, aumenta la movilidad, provocando un aumento del tráfico. Además, las intrusiones de polvo sahariano son más frecuentes en el período de verano. Éste patrón también se observa en otros contaminantes cuyo origen se asocia al tráfico rodado, como el CO y el NO_2 o las PM_1 y $\text{PM}_{2.5}$. Cabe destacar que los valores correspondientes a la estación de Granada Norte son algo superiores al resto, lo cual se observa también para el CO y el NO_2 , ya que ésta estación se clasifica como estación de tráfico, de modo que estará más influenciada por el mismo que el resto. En el caso del O_3 (Figura 22), los patrones obtenidos experimentan una tendencia contraria a los del NO_2 (Figura 21), ya que, como se ha comentado anteriormente, la degradación del NO_2 , entre otros, da lugar a la formación de O_3 .

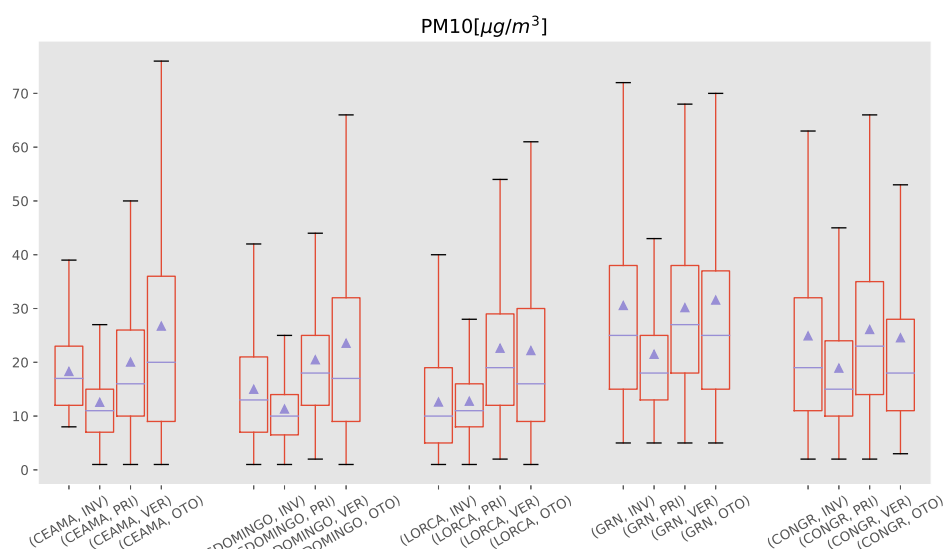


Figura 20: Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de PM_{10} para cada estación de medida.

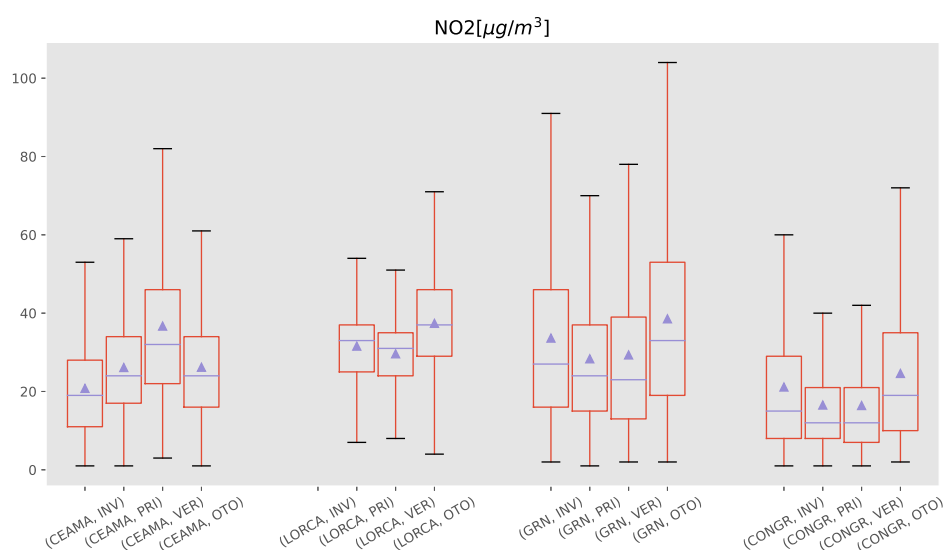


Figura 21: Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de NO_2 para cada estación de medida.

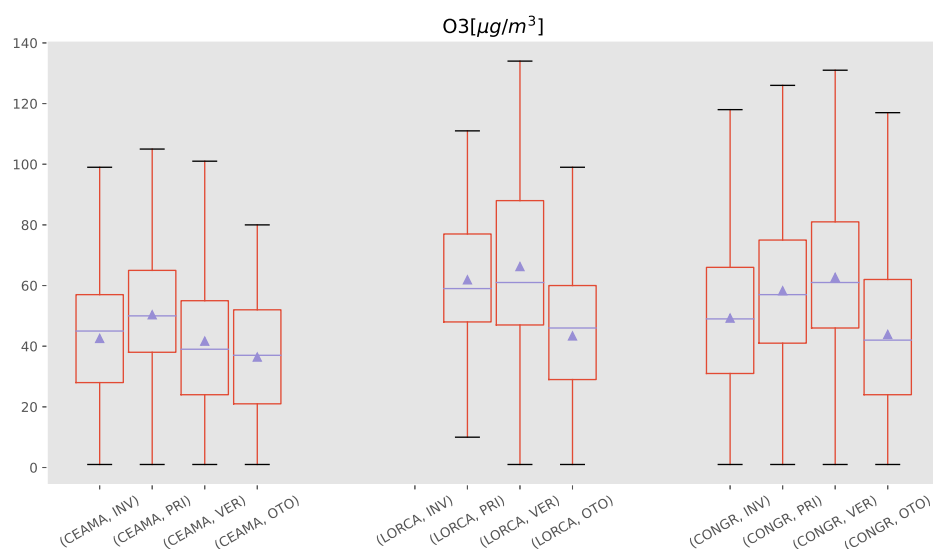


Figura 22: Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de O_3 para cada estación de medida.

Para el SO_2 (Figura 23) se obtienen patrones prácticamente planos, al igual que sucedía con los patrones semanales, lo que indica que las concentraciones se mantienen estables durante todo el año, lo cual refleja la no existencia de industria en Granada. Sí se observan valores más bajos en el período de invierno para la estación de Palacio de Congresos y primavera en la estación de Santo Domingo, aunque solo resulta significativo en la media.

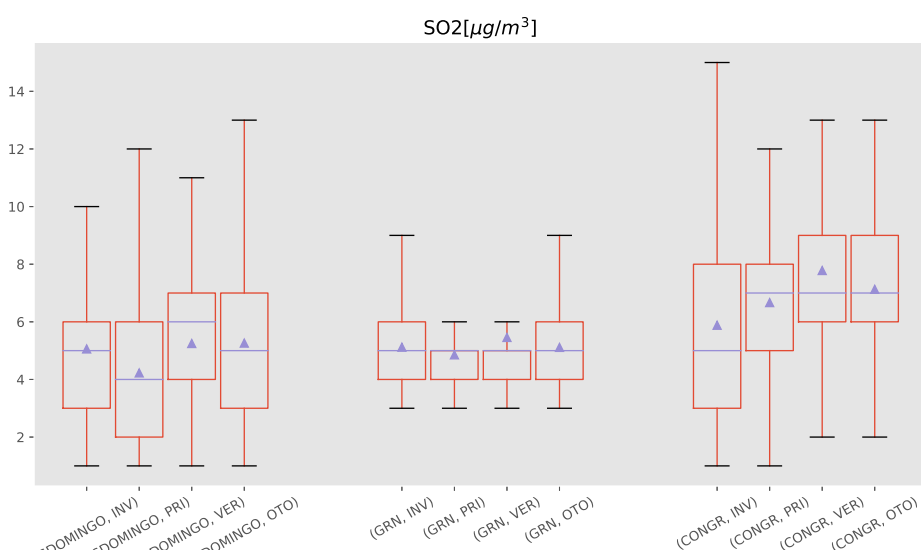


Figura 23: Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de SO_2 para cada estación de medida.

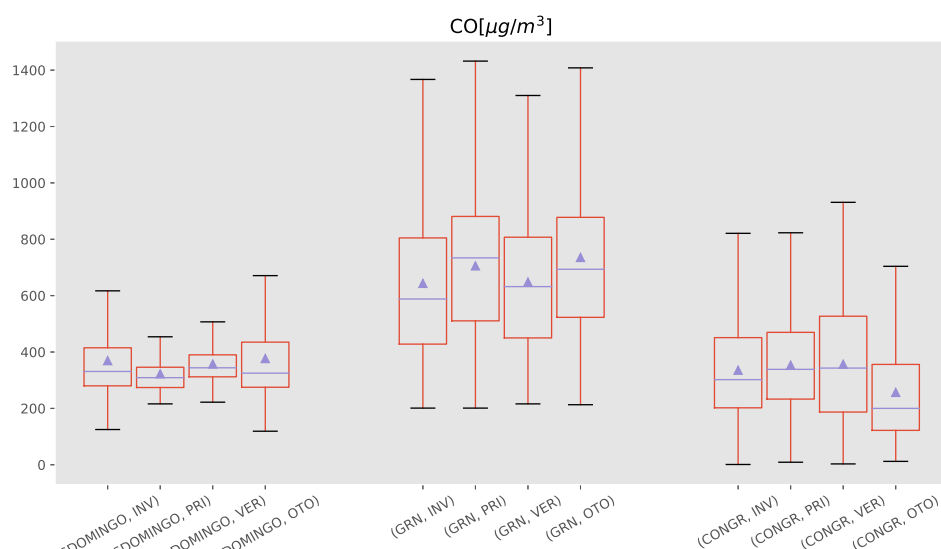


Figura 24: Diagrama de cajas y bigotes (boxplot) de las medias estacionales de CO para cada estación de medida.

4.6 Superaciones de valores legislados.

En base a la normativa actual existente en cuanto a los objetivos de calidad del aire fijados [5, 20, 14], se ha realizado un análisis de superaciones a los límites legislados vigentes para la protección de la salud humana. Dicho análisis comprende desde los valores límite anuales hasta los valores límite horarios, pasando por los valores límite diarios.

En lo que respecta a los valores límite anuales para la protección de la salud humana, se han obtenido los resultados de la Tabla 11, teniéndose que no se superan dichos valores en ninguna de las estaciones. Sin embargo, aunque no se muestra en la tabla, si existe una superación del valor límite anual de NO_2 para la protección de ecosistemas en las estaciones de Granada Norte y Centro Lorca, éste último de especial interés pues se trata de una estación de fondo urbano, en la que no existe una influencia directa del tráfico rodado, por lo que, de nuevo, se pone de manifiesto la posible influencia de las calderas de combustión y extracciones de negocios de restauración de la zona.

Tabla 11: Valores límite anuales para cada contaminante y superaciones por estación.

Contaminante	Valor límite anual(VLA)[$\mu g/m^3$]	Superación de VLA
$PM_{2.5}$	20	No
PM_{10}	40	No
NO_2	40	No
SO_2	20	No

En cuanto al número de superaciones del valor límite diario (VLD) se han obtenido los resultados de la Tabla 12, donde los valores límite para el O_3 y el CO se obtienen como el máximo de las medias móviles octohorarias diarias, los cuales, aunque muestran

superaciones al valor límite diario, no alcanzan el máximo de superaciones anuales permitidas. Cabe destacar que para las PM_{10} habrá cierto número de superaciones al valor límite diario debidas a eventos de intrusión de polvo sahariano, siendo el resto debidas en principio a causas antropogénicas. De hecho, sería interesante realizar un estudio para determinar el número de superaciones del Valor Límite Diario de PM_{10} debido a éstas intrusiones.

Tabla 12: Superaciones de los valores legislados por contaminante y estación.

Contaminante	Valor legislado	Valor límite	Número de superaciones	Estación
PM_{10}	Valor límite diario para la protección de la salud humana	$50 \mu g/m^3$ Máximo de 35 superaciones/año	11	CEAMA
			5	Santo Domingo
			5	Centro Lorca
			29	Granada Norte
			20	Congresos
SO_2	Valor límite diario para la protección de la salud humana	$125 \mu g/m^3$ Máximo 24 superaciones/año	0	Santo Domingo
			0	Granada Norte
			0	Congresos
O_3	Valor objetivo para la protección de la salud humana.	$120 \mu g/m^3$ Máx 25 superaciones/3años	0	CEAMA
			1	Centro Lorca
			1	Congresos
CO	Valor límite para la protección de la salud humana.	$10 mg/m^3$	0	Santo Domingo
			0	Granada Norte
			0	Congresos

Por último, el análisis de superaciones del Valor Límite Horario para SO_2 ($350 \mu g/m^3$, máximo 24 superaciones por año) y NO_2 ($200 \mu g/m^3$, máximo 18 superaciones por año) muestra que no existe ninguna superación a estos límites, para todas las estaciones que registran datos de éstos contaminantes.

Por tanto, se puede concluir que la calidad del aire en Granada se encuentra dentro de los límites legislados, aunque existe un gran número de superaciones en partículas atmosféricas, de la cuales habrá cierto número de ellas causadas por fenómenos naturales.

5 Resumen y conclusiones más relevantes.

Para analizar los principales contaminantes (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10} , NO_2 , O_3 , CO y SO_2) se han tomado los datos horarios en cinco estaciones de medida, dos de la Junta de Andalucía y tres de la Red Airly de sensores de bajo coste. De todas ellas, una se clasifica como estación de tráfico (Granada Norte) y el resto como estaciones de fondo urbano.

Las medias anuales en obtenidas en las estaciones Airly son similares en PM, mientras que para gases (NO_2 y O_3) se tienen valores superiores en Centro Lorca. Para la Junta de Andalucía se encuentran valores superiores en Granada Norte respecto a Palacio de Congresos, destacando el valor de CO en Granada Norte, $(680.0 \pm 270.3) \mu g/m^3$, el doble respecto a Palacio de Congresos, $(326.1 \pm 199.7) \mu g/m^3$.

Por otro lado, se han obtenido sinergias entre PM en Airly, además de entre CO y PM (0.46-0.49). Se destaca la relación directa entre NO_2 y CO en Granada Norte (0.51) y la relación inversa entre NO_2 y O_3 en Palacio de Congresos (-0.61).

En cuanto a los patrones horarios, se observan patrones típicos para PM muy similares en las estaciones Airly, con dos máximos diferenciados, uno en torno a las 10h y el otro sobre las 21-22h, siendo las horas de aumento de concentración las coincidentes con las horas punta de tráfico. Para las estaciones de la Junta de Andalucía, sólo se observa el mismo patrón en Granada Norte, teniendo un patrón no tan bien definido en Palacio de Congresos.

Los patrones horarios de O_3 sí son muy similares en todas las estaciones consideradas, presentando un máximo en torno a las 15h. Dicho máximo coincide con el mínimo observado en el patrón horario de NO_2 en las estaciones de la Junta de Andalucía. De igual modo sucede con el máximo de NO_2 , lo que pone de manifiesto la sinergia existente entre ambos gases.

Los patrones estacionales presentan un aumento de los valores medios de PM en verano y otoño, para todas las estaciones consideradas. Dicho patrón también se observa en gases como el NO_2 , excepto para CEAMA, lo que hace sospechar un mal funcionamiento del sensor. Destacar el patrón del O_3 , de nuevo inverso al que presenta el NO_2 , y el del CO , con valores muy superiores para la estación de Granada Norte. Se observa así un aumento en las concentraciones de los contaminantes estudiados una vez finalizado el estado de alarma.

Se observan superaciones de los Valores Límite Diarios de PM_{10} , sobre todo en Granada Norte (29) y Palacio de Congresos (20), aunque no se alcanza el límite máximo de superaciones al año (35). Destacar la sensibilidad de los sensores oficiales de la Junta de Andalucía en la medida de PM_{10} , sobre todo en eventos de intrusión de polvo sahariano.

Referencias

- [1] Air quality sensor: <https://airly.org/en/features/air-quality-sensors/>.
- [2] Airly: <https://airly.org/>.
- [3] Matplotlib documentation: <https://matplotlib.org/3.1.1/index.html>.
- [4] Miteco. episodios de intrusiones saharianas 2021, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/fuentes-naturales/anuales.aspx>.
- [5] Miteco. evaluación de la calidad del aire, <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/evaluacion-datos/modelizacion/>.
- [6] Pandas documentation: <https://pandas.pydata.org/docs/index.html>.
- [7] Red de vigilancia y control de la calidad del aire de andalucía: <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/web/guest/areas-tematicas/atmosfera/la-calidad-del-aire/red-de-vigilancia-y-control-de-la-calidad-del-aire-de-andalucia>.
- [8] J.A. Adame, A. Notario, C.A. Cuevas, A. Lozano, M. Yela, and A. Saiz-Lopez. Recent increase in NO₂ levels in the southeast of the iberian peninsula. *Science of The Total Environment*, 693:133587, nov 2019.
- [9] Elza Bontempi, Claudio Carnevale, Antonella Cornelio, Marialuisa Volta, and Alessandra Zanoletti. Analysis of the lockdown effects due to the COVID-19 on air pollution in brescia (lombardy). *Environmental Research*, 212:113193, sep 2022.
- [10] Paloma Cariñanos, Inmaculada Foyo-Moreno, Inmaculada Alados, Juan Luis Guerrero-Rascado, Soledad Ruiz-Peñuela, Gloria Titos, Alberto Cazorla, Lucas Alados-Arboledas, and Consuelo Díaz de la Guardia. Bioaerosols in urban environments: Trends and interactions with pollutants and meteorological variables based on quasi-climatological series. *Journal of Environmental Management*, 282:111963, mar 2021.
- [11] J.A. Casquero-Vera, H. Lyamani, G. Titos, E. Borrás, F.J. Olmo, and L. Alados-Arboledas. Impact of primary NO₂ emissions at different urban sites exceeding the european NO₂ standard limit. *Science of The Total Environment*, 646:1117–1125, jan 2019.
- [12] L Clapp. Analysis of the relationship between ambient levels of o₃, NO₂ and NO as a function of NO_x in the UK. *Atmospheric Environment*, 35(36):6391–6405, dec 2001.
- [13] Alexandra Delgado Jiménez and Equipo OSE. *Calidad del aire en las ciudades: clave de sostenibilidad urbana*. 01 2007.
- [14] Comunidad Europea. Directiva 2008/50/ce relativa a la calidad del aire ambiente ya una atmósfera más limpia en europa, 2008.

- [15] Suqin Han, Hai Bian, Yinchang Feng, Aixia Liu, Xiangjin Li, Fang Zeng, and Xiaoling Zhang. Analysis of the relationship between o_3 , NO and NO₂ in tianjin, china. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(2):128–139, 2011.
- [16] Alana Jakob, Saberina Hasibuan, and Dian Fiantis. Empirical evidence shows that air quality changes during COVID-19 pandemic lockdown in jakarta, indonesia are due to seasonal variation, not restricted movements. *Environmental Research*, 208:112391, may 2022.
- [17] Aida Pinos Navarrete y Agustín Fernández Navarro Juan Carlos Maroto Martos. Por un desarrollo sostenible de la vega and de granada and (españa) coordinación. 2021.
- [18] Viedma Muñoz M. Análisis de las direcciones de los vientos en andalucía. *Nimbus*, 1:153 – 168, 1998. Cited by: 12.
- [19] Jerónimo Vida Manzano, Alados Arboledas, and Francisco Muñoz Collado. Estudio de calidad del aire en la ciudad de granada.
- [20] World Health Organization et al. *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide: executive summary*. World Health Organization, 2021.
- [21] Ishaq Dimeji Sulaymon, Yuanxun Zhang, Philip K. Hopke, Yang Zhang, Jinxi Hua, and Xiaodong Mei. COVID-19 pandemic in wuhan: Ambient air quality and the relationships between criteria air pollutants and meteorological variables before, during, and after lockdown. *Atmospheric Research*, 250:105362, mar 2021.
- [22] G. Titos, H. Lyamani, L. Drinovec, F.J. Olmo, G. Močnik, and L. Alados-Arboledas. Evaluation of the impact of transportation changes on air quality. *Atmospheric Environment*, 114:19–31, aug 2015.
- [23] G. Titos, H. Lyamani, M. Pandolfi, A. Alastuey, and L. Alados-Arboledas. Identification of fine (PM₁) and coarse (PM₁₀₋₁) sources of particulate matter in an urban environment. *Atmospheric Environment*, 89:593–602, jun 2014.
- [24] Aurelio Tobías, Cristina Carnerero, Cristina Reche, Jordi Massagué, Marta Via, María Cruz Minguillón, Andrés Alastuey, and Xavier Querol. Changes in air quality during the lockdown in barcelona (spain) one month into the SARS-CoV-2 epidemic. *Science of The Total Environment*, 726:138540, jul 2020.
- [25] Zhang Wen, Chenjing Wang, Qi Li, Wen Xu, Li Lu, Xiujuan Li, Aohan Tang, Jeffrey Lee Collett, and Xuejun Liu. Winter air quality improvement in beijing by clean air actions from 2014 to 2018. *Atmospheric Research*, 259:105674, sep 2021.

Propuesta de Trabajo Fin de Grado en Física

Tutor/a:	Inmaculada Foyo Moreno
Departamento y Área de Conocimiento:	Física Aplicada
Correo electrónico:	ifoyo@ugr.es
Cotutor/a:	Jerónimo Vida Manzano
Departamento y Área de Conocimiento:	Física Aplicada
Correo electrónico:	jvida@ugr.es

Título del Trabajo: Diagnóstico de la calidad del aire en Granada mediante sensores de red inteligente

Tipología del Trabajo: (Según punto 3 de las Directrices del TFG aprobadas por Comisión Docente el 10/12/14)	(Marcar con X)	1. Revisión bibliográfica		4. Elaboración de nuevas prácticas de laboratorio	
		2. Estudio de casos teórico-prácticos	X	5. Elaboración de un proyecto	
		3. Trabajos experimentales		6. Trabajo relacionado con prácticas externas	

Breve descripción del trabajo:

El uso de sensores (AIRLY) instalados recientemente en diferentes puntos de la ciudad de Granada, nos permite caracterizar la calidad del aire en esta ciudad, dado que este sensor suministra información en tiempo real cada minuto de medidas de partículas en diferente rango de tamaños: PM1, PM2,5 y PM10 y gases contaminantes como NO, NO₂, SO₂, O₃, CO y H₂S, siendo estos datos accesibles a través de la plataforma de Airly. El análisis de estos contaminantes en una zona urbana como Granada, donde la principal fuente de contaminación es el tráfico rodado y la calefacción doméstica, son de gran interés dado que la calidad del aire afecta directamente en la salud de las personas, en concreto un informe de la OMS señala que la contaminación del aire causa 6,5 millones de muertes cada año en el mundo, precisamente, dada la situación de pandemia que estamos viviendo en la actualidad, podemos además evaluar la transición a la vuelta a la normalidad, una vez finalizado el estado de alarma creado como consecuencia de la pandemia provocada por el COVID-19.

Objetivos planteados:

Objetivo general: Evaluar la calidad del aire en Granada mediante sensores automatizados pertenecientes a la red inteligente.

Objetivos específicos:

1. Comparación de los niveles de calidad del aire en diferentes puntos de la ciudad.
2. Comparación entre el período correspondiente al estado alarma y el periodo posterior.
3. Estimación de sinergias entre diferentes contaminantes y otros parámetros de influencia.

Metodología:

En primer lugar, se llevará a cabo la recogida de datos tanto de partículas como de gases contaminantes a través de los sensores AIRLY, para posteriormente realizar un análisis mediante herramientas estadísticas de caracterización espacial y temporal de la calidad del aire en la ciudad de Granada. Se comparará entre periodos que abarquen el estado de alarma y posterior y se aplicarán técnicas de correlación para evaluar posibles sinergias.

Bibliografía:

- Sulaymon et al. (2021). *Atmospheric Research* 250 (2021) 105362. "COVID-19 pandemic in Wuhan: Ambient air quality and the relationships between criteria air pollutants and meteorological variables before, during, and after lockdown".
- Wen et al. (2021). *Atmospheric Research* 259 (2021) 105674. Winter air quality improvement in Beijing by clean air actions from 2014 to 2018.
- Casquero-Vera et al. (2019). *Science of the Total Environment* 646 (2019) 1117–1125. "Impact of primary NO₂ emissions at different urban sites exceeding the European NO₂ standard limit".
- Rogulski1 and Badyda (2019). *Second International Conference on the Sustainable Energy and Environmental. "DevelopmentCurrent trends in network based air quality monitoring systems"*.
- Adame et al., (2019). *Science of the Total Environment* 693 (2019) 133587. Recent increase in NO₂ levels in the southeast of the Iberian Peninsula.

A rellenar sólo en el caso que el alumno sea quien realice la propuesta de TFG
Alumno/a propuesto/a:

Granada, 12 de mayo de 2021

Sello del Departamento