



**FACULTAD DE BIOLOGÍA, CIENCIAS AMBIENTALES Y QUÍMICA**

**GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

## **TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**Episodios de contaminación atmosférica y efectos sobre la salud**

Autor: Miguel Martínez Illana  
Tutor/es: Jesús Guardiola Soler

2018

FACULTAD DE BIOLOGÍA, CIENCIAS AMBIENTALES Y QUÍMICA

-

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES  
TRABAJO DE FIN DE GRADO

**EPISODIOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y EFECTOS SOBRE LA  
SALUD**

Tribunal de calificación:

(Firma)

Presidente: \_\_\_\_\_

(Firma)

Vocal 1º: \_\_\_\_\_

(Firma)

Vocal 2º: \_\_\_\_\_

Calificación: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

**INFORME PARA LA DEFENSA PÚBLICA DEL TRABAJO DE FIN DE GRADO**

D/D<sup>a</sup> Jesús Guardiola Soler, profesor/es del Departamento de Q.A., Q.F e Ingeniería Química de la UAH, como tutor/res del Trabajo de Fin de Grado en Ciencias Ambientales de D/D<sup>a</sup> Miguel Martínez Illana titulado “Episodios de contaminación atmosférica y efectos sobre la salud”.

(\*) Realizado en \_\_\_\_\_

(\*) Dirigido por D/D<sup>a</sup> \_\_\_\_\_

INFORMA:

- FAVORABLE
- DESFAVORABLE

Alcalá de Henares 21 de Junio de 2018

Firma del tutor

Firma del cotutor

Fdo.: \_\_\_\_\_

Fdo.: \_\_\_\_\_

(\*) Para trabajos realizados fuera de la UAH.

## **Agradecimientos:**

Después de un intenso período de siete meses, agradecer:

En primer lugar, a mi tutor de este trabajo D. Jesús Guardiola Soler por su esfuerzo y dedicación a la hora de realizar una buena orientación y ayuda para que este trabajo saliera lo mejor posible.

A D. Nicolás Antonio Mora y D<sup>a</sup> Mónica Carmona por las facilidades de hacer el trabajo en colaboración.

Finalmente, a mi familia, amigos y todos los profesores que han colaborado conmigo en el TFG y/o a lo largo del grado.

¡Muchas gracias a todos!

Guadalajara, 13 de junio de 2018.

## Índice general:

Resumen .....	1
Abstract: .....	2
1. Introducción .....	3
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Límites establecidos para el ozono .....	7
2. Objetivos .....	7
3. Materiales y métodos .....	8
3.1 Descarga de datos .....	8
3.1.1 Ozono .....	10
3.1.2 Óxido nítrico .....	10
3.2 Tratamiento de los datos .....	11
3.3 Obtención de los episodios .....	12
3.4 Obtención del Patrón local de inmisión .....	12
3.4.1 Planteamiento .....	13
3.4.2 Datos experimentales .....	13
3.4.3 Método propuesto .....	13
3.4.4 Criterio para encontrar los límites entre las estaciones del año .....	14
4. Resultados y discusión .....	15
4.1 Episodios de contaminación por ozono .....	15
4.2 Estudio riguroso de los niveles de ozono .....	18
4.3 Estudio riguroso de los niveles de óxido nítrico .....	22
4.4 Interacción ozono-óxido nítrico .....	24
5. Conclusiones .....	26
6. Bibliografía .....	27
7. Anexos .....	31

### Índice tablas:

Tabla 4.1. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral (UT). .....	16
Tabla 4.2. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral (UF). .....	16
Tabla 4.3. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral anualmente (SUB). .....	16
Tabla 4.4. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral según las estaciones astronómicas (UT). .....	17
Tabla 4.5. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral según las estaciones astronómicas (UF). .....	17
Tabla 4.6. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral según las estaciones astronómicas (SUB). .....	18

### Índice figuras:

Figura 1.1. Relación entre la concentración de O <sub>3</sub> y las emisiones de NO <sub>x</sub> . .....	5
Figura 3.1. Ubicación de las estaciones utilizadas. .....	10
Figura 4.1. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Escuelas Aguirre (UT). .....	19
Figura 4.2. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Plaza del Carmen (UF). .....	19
Figura 4.3. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación El Pardo (SUB). .....	19
Figura 4.4. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Casa de Campo. ....	22
Figura 4.5. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Casa de Campo (corregido). .....	22
Figura 4.6. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de Escuelas Aguirre (UT). .....	24
Figura 4.7. PLI de NO. Estación de Escuelas Aguirre (UT). .....	24
Figura 4.8. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de Plaza del Carmen (UF). .....	25
Figura 4.9. PLI de NO. Estación de Vallecas (UF). .....	25
Figura 4.10. PLI de O <sub>3</sub> . Estación Casa de Campo (SUB). .....	25
Figura 4.11. PLI de NO. Estación de Casa de Campo (SUB). .....	25
Figura 4.12 Patrones locales de inmisión de O <sub>3</sub> y NO, µmoles/m <sup>3</sup> . .....	26

**Resumen:**

En la época actual cada vez está adquiriendo más importancia el estudio de la calidad del aire. Para ello es necesario conocer el estado del ambiente y los contaminantes que puede albergar la atmósfera a estudiar, en este caso la ciudad de Madrid. En el presente trabajo, en primer lugar, se lleva a cabo una revisión bibliográfica para conocer el estado del tema, especialmente las causas y efectos del O<sub>3</sub> y NO, contaminantes estudiados, sobre la salud. Se completa con las normas que los Organismos responsables de salud han establecido para ellos.

Para alcanzar los objetivos de identificar los episodios y proponer los modelos que representan el estado ambiental en ciertos lugares de la ciudad se utiliza la base de datos que el Ayuntamiento de Madrid ofrece.

En el estudio se describen las características de la correspondiente web, el proceso de descarga y manipulación de los datos para ocho estaciones de medida y los dos contaminantes citados. Las estaciones son de tres tipos diferentes dependiendo de la influencia que el tráfico tiene sobre ellas.

Se contabilizan los episodios de contaminación que tienen lugar para el contaminante principal del estudio, considerando estos como la concentración que supera los umbrales establecidos por la Unión Europea, ligeramente diferentes a los recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

Por último, los modelos representativos del estado ambiental local o patrones locales de inmisión, PLI, ofrecen la posibilidad de analizar las semejanzas y diferencias entre los niveles de O<sub>3</sub> y NO, así como la relación entre ellos.

**Palabras clave:** ozono, contaminación atmosférica, óxido nítrico, calidad del aire, patrón, episodio de contaminación, perfil semanal.

**Abstract:**

At the present time, it is acquiring more importance the study of air quality. For that purpose, it is required to know the state of the environment and pollutants which can contain the atmosphere which is going to study, specifically the city of Madrid. First, the aim of this paper is to carry out a bibliographic review to know the state of the topic, specially causes and effects of O<sub>3</sub> and NO, studied pollutants about health. It is concluded with the rules that responsible organisms of health have established for them.

It is used the database which offers the Council of Madrid to reach these goals to identify the episodes and to propose the models which represent the environmental state in some places of the city.

In the survey is described characteristics of the appropriate web, the process of download and manipulation of dates for eight measuring stations and the pollutants previously cited. The stations are of three several types depending of the influence of the traffic which has above them.

It is taken in account pollution episodes which have place for the main pollutant of the survey, considering these as the gathering that overtake the established threshold by European Union, slightly different to the recommended by the World Health Organization.

Lastly, representative models of local environmental state or local patterns of immission, PLI, offer the chance to analyze the similarities and differences between the levels of O<sub>3</sub> and NO just like the relationship between them.

**Key words:** ozone, pollution, nitric oxide, air quality, pattern, pollution episode, weekly profile.

## **1. Introducción**

### 1.1 Antecedentes

A lo largo de los tiempos siempre ha existido contaminación. Se entiende por contaminación ambiental la presencia indeseable de sustancias, organismos o formas de energía en un sustrato (Albert, 2004).

La contaminación puede tener origen natural o antropogénico. Es decir, tanto la naturaleza como las actividades humanas son las causas que las producen (Albert, 2004). En el caso de la contaminación atmosférica (CA) las fuentes se clasifican, teniendo en cuenta su tamaño, en puntuales y extensas.

La Organización Mundial de la Salud considera la CA como una de las prioridades de mayor importancia a nivel mundial en el ámbito de la salud (Ballester, 2005). Así como ejemplo, se registraron y atribuyeron 217 000 muertes provocadas por la exposición a largo plazo al ozono (Brauer, Freedman et al. 2016).

Existen importantes sectores de la población que se encuentran expuestos a contaminantes atmosféricos lo que conlleva posibles repercusiones negativas sobre su salud (Ballester, 2005). En países en vías de desarrollo esta exposición es aún mayor. Además, a esto, se suma la repercusión negativa que las emisiones causantes del cambio climático tienen directa o indirectamente sobre la salud.

Los contaminantes atmosféricos provienen de fuentes móviles (tráfico rodado) o de fuentes fijas de combustión (industrias, usos residenciales climatización, y procesos de eliminación de residuos). Según su procedencia, se distinguen dos tipos de contaminantes atmosféricos, los primarios y secundarios. Los primarios son los que proceden directamente de la fuente de emisión, mientras que los secundarios se producen por las transformaciones y reacciones, químicas y físicas, que sufren los primarios en el seno de la atmósfera, distinguiéndose entre otras, la contaminación fotoquímica y la acidificación del medio (Ballester, 2005).

La contaminación fotoquímica engloba principalmente la contaminación procedente de las reacciones de los hidrocarburos y los óxidos de nitrógeno, que se ven favorecidas por la luz solar intensa y el aumento de la temperatura (T). El

ozono se considera como el componente más tóxico que se produce de esta mezcla. Se forma por la acción de la radiación solar ultravioleta sobre los NO<sub>x</sub> en presencia de compuestos orgánicos volátiles y otros contaminantes (Ballester, 2005).

Se debe tener en cuenta que los problemas medioambientales globales del cambio climático y la contaminación del aire están estrechamente relacionados, en particular el ozono en forma gaseosa (O<sub>3</sub>). Se cree que las concentraciones de esta especie en la troposfera han aumentado significativamente desde tiempos preindustriales, como resultado directo de las actividades humanas (Stevenson, Dentener et al. 2006).

Se estima que los aumentos del O<sub>3</sub> troposférico representan la tercera contribución más grande de gases de efecto invernadero al forzamiento radiativo del cambio climático durante este período de tiempo, con un forzamiento equivalente a un 24% del dióxido de carbono (Stevenson, Dentener et al. 2006).

Como se sabe, existen el ozono troposférico y el estratosférico, según la capa de la atmósfera en que se encuentre, se considera como un contaminante el troposférico ya que es el que produce unos efectos nocivos sobre el medio. Mientras que el ozono estratosférico absorbe parte de la radiación ultravioleta de origen solar, reduciendo la cantidad que llega a la superficie terrestre (Gobierno de Aragón, 2018).

Debido a que el ozono es de tipo secundario, suele alcanzar los mayores valores en zonas alejadas de los focos emisores, más concretamente, los valores medios se encuentran en estaciones de fondo, que se ubican en zonas semiurbanas y rurales. Las concentraciones medias anuales alcanzan los 60 g/m<sup>3</sup> (Ballester, 2005). Además, puesto que el ozono tiene un tiempo de residencia elevado, es posible su transporte a larga distancia llegando a aparecer niveles altos de este contaminante a escala regional y urbana, no solo por ser de tipo secundario (Sousa, Martins et al. 2007).

El ozono presenta estacionalidad anual, así, si bien las emisiones se mantienen a lo largo del año, es en los meses más cálidos cuando tienen lugar los valores más altos debido a la interacción de los rayos ultravioleta con los gases precursores. El patrón diario del ozono presenta picos en las horas en las que el

aporte de radiación solar crece, de manera que, en estos picos es donde suelen darse valores extremos. Por esto es fácil correlacionar los niveles de ozono con la temperatura y predecir que con el cambio climático tendrá lugar un incremento de los niveles de este contaminante (Ballester, 2005).

Existen dos fuentes de ozono troposférico: el transporte desde la estratosfera y la producción química in situ. La producción de ozono tiene lugar cuando el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos se oxidan fotoquímicamente en presencia de óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ ) (Stevenson, Dentener et al. 2006).

El balance de ozono se cierra por dos procesos de pérdida: deposición seca a la superficie de la Tierra y destrucción química. La destrucción del ozono se produce principalmente a través de reacciones con vapor de agua (después de la fotólisis) y con radicales hidroxilo, peroxi e hidroxilo ( $\text{HO}_x = \text{HO}_2 + \text{OH}$ ). Integrado en la troposfera en su conjunto, la producción química y las tasas de pérdida son varias veces superiores a la afluencia desde la estratosfera y el flujo de deposición superficial (Stevenson, Dentener et al. 2006).

Los principales precursores de ozono (CO, hidrocarburos y  $\text{NO}_x$ ) se emiten como consecuencia de las actividades humanas, además existen importantes fuentes naturales. Los  $\text{NO}_x$  afectan a la destrucción de la especie que se viene considerando (Stevenson, Dentener et al. 2006).

Los cambios en la carga de ozono troposférico asociados (Figura 1.1) en estos tres escenarios distintos de este artículo muestran una relación claramente lineal con los cambios en las emisiones de  $\text{NO}_x$  (Stevenson, Dentener et al. 2006).

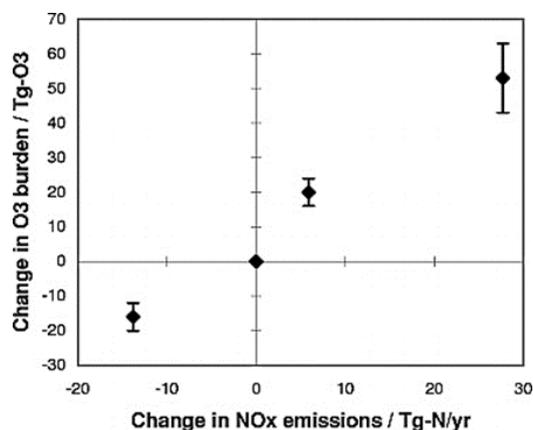


Figura 1.1. Relación entre la concentración de  $\text{O}_3$  y las emisiones de  $\text{NO}_x$ . Fuente: Stevenson, Dentener et al. 2006.

El cambio climático tiende a reducir aún más la vida útil, principalmente a través de aumentos en el vapor de agua, promoviendo la principal reacción de pérdida de ozono. Sin embargo, esto se ve contrarrestado en algunos modelos por el crecimiento de la afluencia estratosférica, que aumenta las concentraciones de ozono en la troposfera superior, donde su tiempo de vida es más prolongado (Stevenson, Dentener et al. 2006).

Hay claros beneficios de seguir una trayectoria de reducciones de emisiones globales, tanto en términos de reducir el cambio climático, como para mejorar la calidad del aire y disminuir los impactos ambientales de la deposición de nitrógeno y azufre (Stevenson, Dentener et al. 2006).

El ozono es un riesgo para la salud ya que existe una relación entre la exposición al ozono y la función pulmonar. Alrededor de 0.7 millones de personas/año mueren en todo el mundo debido a la exposición al ozono troposférico (Khaniabadi, Goudarzi et al. 2017).

A la hora de estudiar el ozono es importante conocer también la cantidad de metano que hay en la región atmosférica elegida ya que el metano es precursor de ozono y vapor de agua estratosférico (Stohl, Aamaas et al. 2015).

Existen estudios en los cuales se proponen modelos tanto de la distribución actual del ozono (Myhre, Aas et al. 2017), como de la pasada (cuando no existían sistemas de medición) y de pronósticos para la evolución en el futuro (Stevenson, Young et al. 2013).

Es importante realizar simulaciones, ya que los modelos permiten elaborar relaciones y estimaciones, ya sea a nivel global como en el artículo anterior o bien a menor escala como Brauer, Freedman et al. (2016) que propone mapas de distribución del ozono por interpolación.

En otro estudio (Atkinson, Carey et al. 2013), la validación del modelo se llevó a cabo utilizando datos de redes nacionales de control de la calidad del aire (en las que también se basó la calibración global del modelo) y de otra segunda red de monitores que también producen datos de alta calidad (sitios de verificación). Estos sistemas de redes de vigilancia serán utilizados en el presente estudio.

## 1.2 Límites establecidos para el ozono

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece como límite aconsejable los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Organización Mundial de la Salud, 2006), en una media de 8 horas, debido a que se han observado afecciones en la salud de la población en concentraciones por debajo de los  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  que son los establecidos como umbral (Ministerio de la presidencia, 2011), por encima del valor guía el número y gravedad de casos negativos aumentan considerablemente.

Los umbrales según el Ministerio de la Presidencia y los recomendables en la Guía de la OMS, se recogen de forma más detallada en los Anexos 7.7 y 7.8. Además, se incluyen en el Apéndice 7.8 las medidas de implantación a diferentes escalas, tanto micro como macro, que requieren las estaciones dependiendo del tipo que sean. La elección del emplazamiento de las estaciones se documenta y revisa periódicamente.

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de relacionar la contaminación con la salud son los episodios de contaminación. Así, se consideran tales cuando los niveles de algún contaminante supera los valores máximos establecidos por la Unión Europea (Ayuntamiento de Madrid, 2015).

Estos episodios se suelen producir cuando en el periodo existe un anticiclón, que se caracteriza por ausencia de viento y precipitaciones, unido a valores elevados de emisiones procedentes en su mayor parte del tráfico rodado o por transporte de contaminantes de otras regiones (Ayuntamiento de Madrid, 2015).

El Ayuntamiento de Madrid ha elaborado un protocolo de medidas para actuar en caso de estos episodios de contaminación (Anexo 7.6.2).

## 2. Objetivos

El presente trabajo se planteó para estudiar los efectos que los episodios de contaminación atmosférica producidos en el pasado reciente en la ciudad de Madrid podían haber tenido sobre la salud de sus ciudadanos. Se plantearon este y otros dos TFGs.

Los dos grupos de datos en que se basan este tipo de estudios son, por tanto, la identificación de los episodios y los ingresos hospitalarios por patologías

respiratorias o pulmonares. El primer conjunto de datos procede de la Red de Calidad de la Comunidad de Madrid. Para el segundo conjunto nos pusimos en contacto con cuatro Hospitales de la ciudad que inicialmente mostraron disponibilidad a suministrarlos, con la imprescindible condición de suprimir toda identificación de datos personales. Los Centros sanitarios propusieron preparar los datos, pero los plazos se han retrasado tanto que finalmente solo uno los proporcionó y con la fuerte restricción de que el tutor y el alumno firmaran un exigente compromiso de confidencialidad.

Por esta limitación, el trabajo se reorientó hacia un primer objetivo, detectar los episodios de contaminación producidos en Madrid en el periodo 2012/15. Entre los diferentes contaminantes posibles, se eligió el ozono por sus efectos agudos sobre la salud.

Al avanzar el trabajo se encontraron resultados poco explicables, como que lugares relativamente próximos -unos 2-3 km entre las distintas estaciones de medida- sometidos a niveles similares de radiación solar (RS) daban importantes diferencias de concentración de ozono. Para tratar de explicarlo se propuso encontrar el estado normal de concentración de O<sub>3</sub> en diferentes lugares, los que la Red de Calidad calificaba como Estaciones urbana tráfico, fondo y suburbana; estado normal pero con muy alta resolución. Por ello, el segundo objetivo fue elaborar los correspondientes patrones locales de inmisión (PLI).

Por último, por si la relación de este contaminante con los NO<sub>x</sub> explicaba los resultados anómalos, el tercer objetivo fue obtener los PLI del óxido nítrico.

### **3. Materiales y métodos**

#### **3.1 Descarga de datos**

Para proceder a la descarga de datos, se accede a la página web del Ayuntamiento de Madrid. En ella se visualizan y están a disposición del público los datos de contaminación atmosférica, es decir de la calidad del aire en diferentes formatos, en el presente trabajo son de interés los horarios registrados por años, que poseen una frecuencia de actualización mensual.

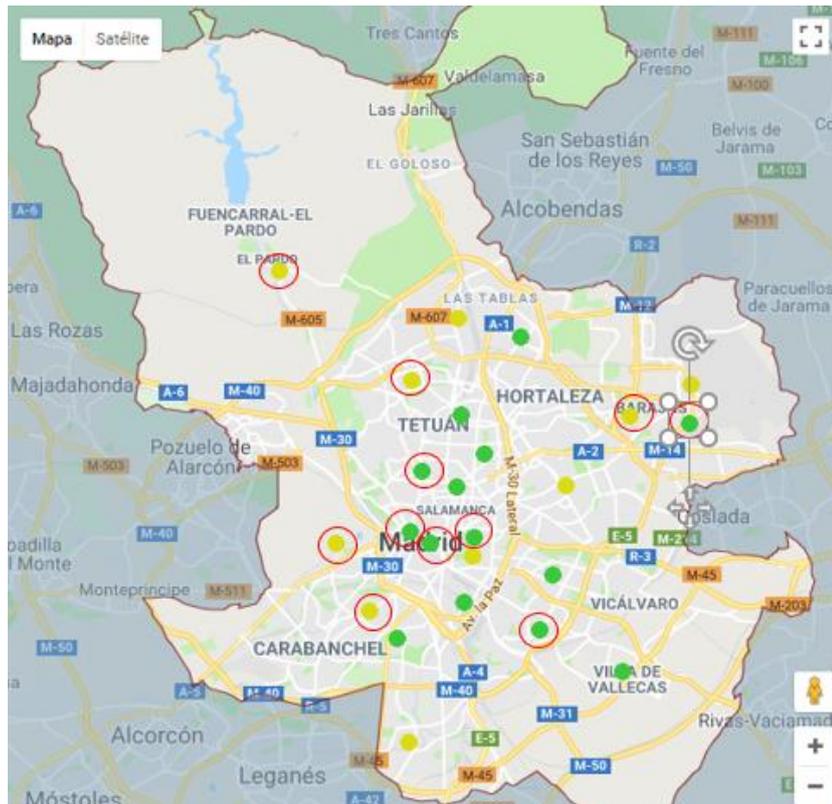
Se trabajará descargando los datos de los paquetes anuales de los años 2012 a 2015. Cada archivo se descarga en formato .zip, el cual se deberá descomprimir a formato .txt., se abrirá de forma predeterminada con el bloc de notas, ya que es un formato muy sencillo aunque con este programa no se pueden llevar a cabo muchas operaciones. Por ello, se pasan los datos proporcionados por el Ayuntamiento de Madrid al programa Excel.

El Sistema de Vigilancia consta de 24 estaciones que trabajan de forma automática recogiendo la información básica de los niveles de los contaminantes, tanto gases como partículas, que se miden en cada estación (Ayuntamiento de Madrid, 2016). Estas estaciones son de 3 tipos:

- Urbana de fondo (UF): permiten representar la exposición de la población urbana de una forma general.
- De tráfico (UT): están ubicadas de tal forma que los niveles de los contaminantes están influidos por las emisiones que proceden de una calle o avenida cercana, aunque evitando la medida de microambientes, es decir, alejados lo máximo posible de chimeneas o fuentes de contaminación muy cercanas.
- Suburbanas (SUB): Están situadas a las afueras de la ciudad, más alejadas de la ciudad.

El presente trabajo forma parte, junto con los realizados por D. Nicolás Antonio Mora y D<sup>a</sup> Mónica Carmona, de un estudio más amplio sobre el estado de la Contaminación Ambiental en la ciudad de Madrid. Por ello la descarga de los datos ha sido realizada por los tres, utilizando después el conjunto de medidas en función de los objetivos establecidos para cada TFG.

Según este modo de trabajo, el autor ha descargado los datos de las estaciones de Plaza de España, Plaza del Carmen, Cuatro Caminos, Urbanización Embajada y Parque Juan Carlos I, si bien se ha dispuesto de los datos correspondientes a Barrio del Pilar, Casa de Campo, El Pardo, Escuelas Aguirre, C/Farolillo, y Vallecas (Figura 3.1). Todas ellas, por el periodo y resolución horaria citados, suponen un total de 1.29 MM datos.



○ Manejadas

Figura 3.1. Ubicación de las estaciones utilizadas. Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2016).

De los contaminantes que la Red de Calidad mide, el ozono se eligió para el presente estudio; dada la interacción que tiene con los  $\text{NO}_x$  también se consideró el óxido nítrico (NO).

### 3.1.1 Ozono

Las medidas utilizadas para encontrar los episodios y para elaborar el Patrón local de inmisión se obtuvieron de las EM: Barrio del Pilar (BP), Casa de Campo (CC), El Pardo (P), Escuelas Aguirre (EA), C/Farolillo (F), Parque Juan Carlos I (PJ) y Plaza del Carmen (PLC).

El método por el cual se mide el  $\text{O}_3$  es por absorción ultravioleta. Esta técnica analítica consiste en medir los cambios de intensidad de un haz de luz ultravioleta al atravesar un cierto volumen de gas que contiene moléculas de  $\text{O}_3$  (Aránguez, Ordoñez et al. 1999).

### 3.1.2 Óxido nítrico

También se ha obtenido el modelo de inmisión de NO para diferentes estaciones, las de Casa de Campo (CC), Escuelas Aguirre (EA) y Vallecas (VA).

El método por el cual se analiza el NO es por Quimioluminiscencia, que consiste en medir la emisión de radiación electromagnética producida cuando tiene lugar una reacción química. Es muy utilizado en los ámbitos biológicos y ambiental (García-Campaña, Baeyens et al. 2001).

Como se ha mencionado, en este caso lo que se busca es la comparación de este contaminante con el ozono, que es el contaminante principal en el presente estudio.

### 3.2 Tratamiento de los datos

El objeto del tratamiento es obtener los datos en formato matriz de dos columnas tiempo-concentración del contaminante. Para ello en un archivo Excel, se copiarán y pegarán los datos que ofrece el Ayuntamiento de Madrid en .txt.

A partir de ella se realiza una separación de los números identificativos de la EM, el contaminante medido, la técnica analítica de medida y el periodo del muestreo; su identificación numérica está disponible en la página del Ayuntamiento de Madrid en el documento de "Interpretación de los datos" (Anexo 7.1 y 7.2). En las tres columnas siguientes se encuentra la fecha en la que se toma el dato y a partir de ahí las 24 medidas horarias recogidas en dicho día.

En una segunda hoja de Excel, dentro del mismo archivo, se pegan como valores todos los datos en columnas y se les da formato numérico mediante una serie de pasos sistematizados, hasta dejarlos con dos decimales.

En otras cinco hojas de Excel se separan los datos por estaciones de medida. Todo lo anterior es realizado para cada mes, ya que es la forma como los ofrece la web de descarga.

Una vez se han descargado los datos por meses, se colocarán ordenados por fecha en un solo documento Excel los recogidos en todas las estaciones dispuestos en columnas. De esta forma se podrá seleccionar o utilizar el periodo temporal que sea de interés tanto el O<sub>3</sub> y NO como para cualquier otro contaminante que se quisiera estudiar.

En resumen, se ha conseguido situar en una sola columna los datos horarios de las fechas seleccionadas, del 5 de marzo de 2012 al 31 de mayo de 2015.

Se debe hacer notar que existen datos válidos y no válidos, ya sea por revisiones manipulando para el mantenimiento de los equipos o por fallo propio de la estación. Se ha descartado eliminar los datos no válidos ya que se han realizado los cálculos mediante promedios y desviaciones y teóricamente no afectaría gravemente a los resultados ni siquiera con valores muy dispares de ellos ya que se trabaja con una cantidad de valores muy alta, por lo que en definitiva apenas varían los promedios ni las desviaciones estándar.

### 3.3 Obtención de los episodios

Los Organismos nacionales e internacionales a partir de estudios de los efectos de los contaminantes sobre la salud, establecen límites de exposición de la población.

Así pues, para identificar los episodios se compararon las medidas según se ha descrito en el Epígrafe 3.2 con los límites establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), y el Ministerio de la Presidencia, que ha traspuesto las Directivas de la Unión Europea.

### 3.4 Obtención del Patrón local de inmisión

Su objetivo es obtener un patrón o perfil de la concentración de un contaminante en un lugar concreto, aquel en el que está situada la estación de medida (EM).

Se basa en las medidas de dicha concentración y sus características son:

- Se segregan en clases con propiedades medioambientales similares.
- Se cuantifica la similitud de las medidas que pertenecen a cada clase (utilizando el parámetro estadístico desviación estándar).

### 3.4.1 Planteamiento

En principio es razonable asumir que el nivel representativo de la concentración de un contaminante en un lugar concreto es el promedio de un número suficiente de medidas.

Sin embargo, los resultados de Barbadillo y Campo, indican que la concentración depende de la hora del día, el día de la semana y con bastante aproximación de la estación del año (EÑ), por tanto, para hacer el promedio no se puede elegir cualquier conjunto de datos (Barbadillo E., 2015 y Campo E., 2014).

### 3.4.2 Datos experimentales

Se utilizan los datos de concentración del contaminante cuyo patrón se quiere obtener, medidos con resolución horaria tal como se han preparado en el Apartado 3.2.

### 3.4.3 Método propuesto

Teniendo en cuenta lo afirmado por dichos autores se decidió separar el conjunto de medidas anuales en cuatro clases, correspondientes a las EÑ. Y elegir cierto número de datos como representativos de cada clase, por ej. los de la semana central de las trece que pertenecen a la estación del año.

Esta decisión presenta el inconveniente de que en la semana elegida se pueden haber producido fenómenos meteorológicos extraordinarios, por ej. episodios de contaminación o alteraciones meteorológicas como pluviometría o vientos extremos.

Una solución para resolver el inconveniente podría ser utilizar datos de varias semanas pertenecientes a la EÑ en cuestión. Así se obtienen todos y cada uno de los puntos del Patrón ( $168 = 7 \text{ días/sem.} \times 24 \text{ h/día}$ ) como promedio de los correspondientes a las semanas utilizadas. Si se toman las trece semanas que forman una estación del año se conseguirá la mayor información y representatividad posibles de las medidas.

Existe un problema con la fijación de los límites de las estaciones. Se debe a que las variables meteorológicas (T, RS), velocidad y dirección del viento (VV y DV),

presión (P), y pluviometría) presentan un doble efecto: sobre los límites de las estaciones y sobre las concentraciones de los contaminantes.

En relación con el primero, dichas variables (principalmente la T y la RS) ejercen una influencia tan importante sobre el clima que han dado lugar a diferentes criterios, siendo los cuatro más extendidos el astronómico, meteorológico, asiático/irlandés y fenológico. En relación con el segundo efecto, la presencia y cantidad de un contaminante en un punto concreto -en este caso la atmósfera de Madrid- es el resultado de un balance entre su generación y desaparición. Ambas son consecuencia de la existencia de focos y sumideros tanto de naturaleza física como química. Las principales variables meteorológicas como P, T, RS y pluviometría gobiernan la actuación de los focos y sumideros, especialmente cuando la velocidad de las reacciones químicas en la producción de contaminantes secundarios es quien hace el papel de foco o sumidero.

En resumen, estas circunstancias niegan la supuesta homogeneidad medioambiental de las medidas pertenecientes a cada EÑ quedando, por tanto, los límites temporales indefinidos<sup>1</sup>.

#### 3.4.4 Criterio para encontrar los límites entre las estaciones del año

Como se ha indicado, cada una de las 168 medidas con las que se dibuja la gráfica del Patrón semanal debería ser un promedio de 13 datos,  $\bar{x}_{13}$ . La desviación estándar de las 13 medidas,  $\bar{\sigma}_{13}$ , es una medida de su concentración/dispersión. Más todavía, el cociente  $\bar{x}_{13}/\bar{\sigma}_{13}$  medirá con más rigor el grado de coincidencia entre los datos.

Con estas consideraciones, un criterio para cuantificar el Patrón local de inmisión (semanal),  $I_{PLI}$ , sería:

$$I_{PLI} = \frac{\sum_1^{168} \left( \frac{\sigma_{13}}{\bar{x}_{13}} \right)}{168} \quad (3.1)$$

Parece incluso razonable asignar los parámetros  $\bar{x}_{13}$ ,  $\bar{\sigma}_{13}$  y  $I_{PLI}$  al punto central del intervalo de datos considerado. Así, aplicando la descripción que se viene exponiendo por ej. al invierno astronómico del año en curso, 2017/18, que

---

<sup>1</sup> Así mismo, algunas de las variables afectan al encendido/apagado de las calefacciones, es decir también a los efectos antropogénicos sobre los niveles de los contaminantes.

empezó el 21/12/17 y acabó el 21/03/18, en principio los tres parámetros corresponderán a las 12.00h del día 4 de febrero de 2018.<sup>2</sup>

Calculando el  $I_{PLI}$  para las 8760 h anuales (= 365 días x 24 h/día, año no bisiesto), el mínimo representa el conjunto de medidas de concentración de un contaminante con mayor grado de coincidencia durante 13 semanas consecutivas.

Por último, el criterio que se adopta es que dicho mínimo ofrece el PLI para un contaminante y un lugar dados.

Consideraciones finales:

- Se debe advertir que para calcular el  $I_{PLI}$  desde la 1.00h del día 1 de enero hasta las 24.00h del 31 de diciembre de un año, las medidas necesarias empiezan 6.5 semanas antes de la fecha de inicio y acaban 6.5 semanas después de la final.
- La explicación del modelo se ha hecho basada en medidas de un año. Sin embargo, para obtener mejores resultados, en el presente TFG se han utilizado medidas de tres años, estableciendo la obligada correspondencia entre los días y horas de la semana para los tres años.

## **4. Resultados y discusión**

### **4.1 Episodios de contaminación por ozono**

Aplicando la metodología propuesta en el Apartado 3.3 se encuentra que el número de episodios aumenta a medida el tráfico disminuye. Así, las estaciones de tipo urbana tráfico (Tabla 4.1) presentan menos episodios de contaminación que las estaciones de tipo urbana fondo (Tabla 4.2), siendo prácticamente el doble el valor estos eventos. Por último, las que presentan un número más elevado de episodios son las de tipo suburbanas (Tabla 4.3), alcanzando valores que prácticamente duplican las de UF.

---

<sup>2</sup> Se debe notar que el resultado tiene un ligero error ya que se está considerando que la transición entre las estaciones otoño/invierno e invierno/primavera tiene lugar entre las 24.00h del día 20 y la 1.00h del día 21. Se habla, por tanto de las 12.00h del día 04/02/18 solo a efectos de explicar el concepto de asignación de los parámetros.

Además, es importante hacer notar las ocasiones en que el valor recomendado por la OMS (Organización Mundial de la Salud, 2006), se supera, triplicando o más, las que se alcanza o sobrepasa el establecido por la Unión Europea y en consecuencia el Ministerio de Sanidad ( $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Ministerio de la presidencia, 2011). Existen una serie de medidas propuestas para prevenir problemas sanitarios en el municipio de Madrid recogidas en el Anexo 7.6 (Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental, 2013).

Tabla 4.1. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral (UT).

Estación	Barrio del Pilar		Escuelas Aguirre	
	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2012	24	148	20	145
2013	237	625	103	340
2014	175	568	79	298
2015	26	187	5	50
<b>TOTAL</b>	462	1528	207	833

Tabla 4.2. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral (UF).

Estación	C/Farolillo		Plaza del Carmen	
	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2012	14	165	24	231
2013	320	761	194	520
2014	316	881	277	731
2015	33	160	171	216
<b>TOTAL</b>	683	1967	666	1698

Tabla 4.3. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral anualmente (SUB).

Estación	Casa de Campo		Parque Juan Carlos I		El Pardo	
	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2012	67	407	157	594	80	487
2013	558	1196	378	869	448	1051
2014	428	1068	146	501	355	964
2015	43	214	82	465	69	418
<b>TOTAL</b>	1096	2885	763	2429	952	2920

Analizando el fenómeno de manera más detallada, concretamente ajustando a los límites temporales de las estaciones astronómicas, se tienen valores más bajos en las estaciones UT (Tabla 4.4), después las UF (Tabla 4.5) y los más

altos en las SUB (Tabla 4.6), como era de esperar tras lo citado con anterioridad. De forma general, los veranos son claramente los periodos en los que los episodios de contaminación tienen lugar de una forma muy notoria respecto al resto de las estaciones; como es sobradamente conocido estos episodios no se dan en invierno, mientras que la primavera y el otoño son situaciones intermedias, lo cual está claramente relacionado con la radiación solar y la estabilidad atmosférica.

Tabla 4.4. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral según las estaciones astronómicas (UT).

		Barrio del Pilar		Escuelas Aguirre	
		$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2012	Primavera	0	12	0	19
	Verano	22	123	17	111
	Otoño	2	13	3	15
	Invierno	0	0	0	0
2013	Primavera	4	81	2	24
	Verano	220	488	96	290
	Otoño	13	56	4	25
	Invierno	0	0	1	1
2014	Primavera	19	122	7	52
	Verano	152	422	71	241
	Otoño	4	24	1	5
	Invierno	0	0	0	0
2015	Primavera	26	187	5	50

Tabla 4.5. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral según las estaciones astronómicas (UF).

		C/Farolillo		Plaza del Carmen	
		$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2012	Primavera	2	35	11	102
	Verano	11	114	11	115
	Otoño	1	16	2	14
	Invierno	0	0	0	0
2013	Primavera	16	96	0	11
	Verano	280	581	185	443
	Otoño	23	83	9	66
	Invierno	1	1	0	0
2014	Primavera	82	292	17	132
	Verano	223	537	248	533
	Otoño	7	48	12	66
	Invierno	5	5	0	0
2015	Primavera	32	159	171	216

Tabla 4.6. Número de episodios en los que se ha alcanzado o superado el umbral según las estaciones astronómicas (SUB).

		Casa de Campo		Parque Juan Carlos I		El Pardo	
		$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\geq 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$
2012	Primavera	7	84	74	253	14	118
	Verano	58	287	74	272	60	313
	Otoño	2	36	9	64	6	56
	Invierno	1	2	0	5	0	0
2013	Primavera	67	243	61	222	34	188
	Verano	435	814	316	616	376	731
	Otoño	54	136	1	31	37	131
	Invierno	3	3	0	0	1	1
2014	Primavera	43	203	6	72	20	165
	Verano	355	766	136	397	315	707
	Otoño	28	96	4	29	20	92
	Invierno	0	1	0	47	0	0
2015	Primavera	43	214	82	421	69	418

En resumen, sabiendo que los episodios se producen por la elevación del nivel de  $\text{O}_3$  y esto por el aumento de la RS, es sorprendentemente anómalo que existan diferencias tan relevantes en la concentración de  $\text{O}_3$  entre lugares tan próximos como los existentes entre las EM.

Por ello, se consideró importante estudiar de modo riguroso el comportamiento del  $\text{O}_3$ , y del  $\text{NO}$  con el que está relacionado, lo que se realiza a continuación.

#### 4.2 Estudio riguroso de los niveles de ozono

La concentración de ozono para los tres tipos de estaciones de medida (expresada según se ha definido anteriormente, es decir como media móvil de 13 semanas a lo largo del año) se presenta en las Figuras 4.1 a 4.3. Las de urbana tráfico con unos  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de promedio máximo en la estación de Escuelas Aguirre (Figura 4.1). Después, las de tipo urbana fondo con un valor de unos  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Figura 4.2). El valor más alto se da en las de tipo suburbana, en este caso en la de El Pardo (Figura 4.3) con unos  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto indica que se alcanzan valores de promedios más altos de concentración de ozono en las estaciones más alejadas de los puntos de mayor tráfico.

Además, destacar la importancia de la evolución de la concentración del contaminante con el transcurso de las estaciones astronómicas del año, como se apreciará en las Figuras del Anexo 7.3.1, que se analizan más adelante. Así

los valores cambian desde los meses centrales del año (mayo/junio hasta septiembre) los más elevados, lo cual se relaciona con bastante seguridad con el aumento de temperatura, radiación solar y estabilidad de la presión.

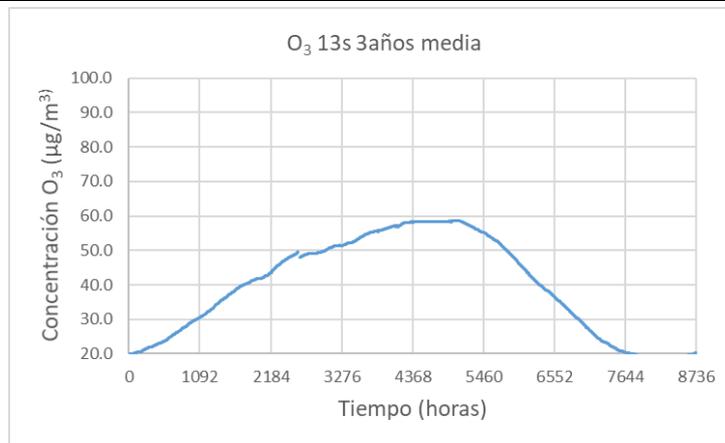


Figura 4.1. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Escuelas Aguirre (UT).

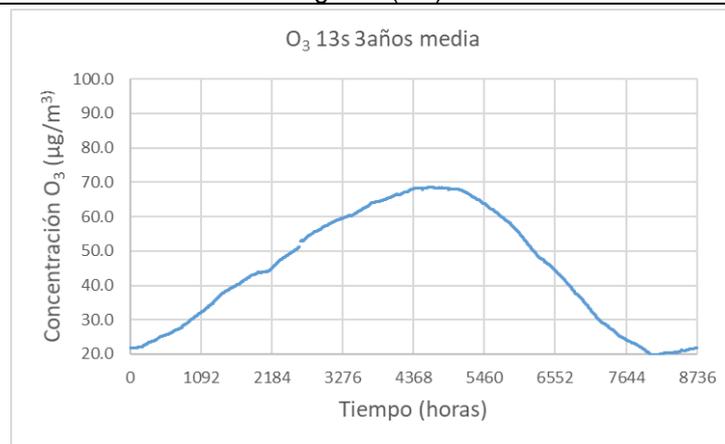


Figura 4.2. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Plaza del Carmen (UF).



Figura 4.3. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación El Pardo (SUB).

La anomalía en forma de “escalón” de la concentración que aparece en todas las gráficas el día 5 de marzo se debe al método de cálculo. Brevemente y relacionado con lo expresado en el Apartado 3.4: a) el cálculo se realiza obteniendo la media móvil a lo largo del año a partir de medidas de los tres años, b) se empieza a hacer el cálculo el día 5 de marzo siendo, por tanto, el último día del 4 del mismo mes, y c) en todo cálculo de esta naturaleza, nunca coinciden el primer y último de los valores obtenidos, a menos que se tratara de un proceso cíclico.

Una vez indicado el comportamiento general de la concentración del contaminante a lo largo del año, para los tipos representativos de EM parece interesante examinar el fenómeno para otras estaciones de medida. Se han incluido en el Apéndice 7.3 por razones de extensión de la memoria. Así, en la estación Barrio del Pilar, los valores del nivel de O<sub>3</sub> se encuentran en un rango de 30-100 µg/m<sup>3</sup>, mientras que el fin de semana en la base se produce un alzamiento y encontramos valores mínimos de 45 µg/m<sup>3</sup>, mientras que los máximos se mantienen aproximadamente como el resto de la semana (Figura AIII.8). Se produce un incremento nocturno desde las 12 de la noche, dando el punto más alto en torno a las 6 de la madrugada. Después se dan valores más bajos y un descenso entre las 8 y las 10, teniendo lugar el valor mínimo a las 9 de la mañana. A partir de las 10 comienza a ascender hasta alcanzar el valor cúspide a las 7 de la tarde.

En términos generales, el rango en el que se encuentra la concentración de O<sub>3</sub> en la estación de la C/Farolillo (Figura AIII.10) oscila durante la semana entre un máximo de 100 µg/m<sup>3</sup> y un mínimo de unos 30 µg/m<sup>3</sup>, mientras que el fin de semana la base se mantiene alrededor de 40-45 µg/m<sup>3</sup>. El máximo diario tiene lugar en torno a las 18-20 horas (ambas incluidas), y se produce un incremento desde las 9 de la mañana en el que se encuentra el valor mínimo (entre semana). El fin de semana, el valor mínimo se da sobre las 8 de la mañana y el máximo hacia las 18-19 horas, manteniéndose en valores próximos a 100 µg/m<sup>3</sup>.

Parque Juan Carlos I (Figura AIII.14), una de las tres estaciones de este tipo, presenta un perfil extraordinariamente parecido a las otras suburbanas. Se aprecia que la recta que dibujan los mínimos queda entre las de Casa de Campo y El Pardo, mientras que la recta de los máximos está situada un poco más baja

que ambas estaciones. Un estudio más elaborado que el presente seguramente encontraría que la causa de estas ligeras diferencias es la velocidad del viento.

Diferenciando entre los tres tipos de estación (UT, UF y SUB), aunque las semejanzas son evidentes se observan diferencias como que las de tipo suburbana muestran promedios de concentración más elevados que los otros dos tipos, también poseen los valores máximos del promedio diarios. Además, en los dos tipos de estaciones urbanas tienen lugar dos ascensos a lo largo del día, mientras que en las suburbanas solo existe uno, al que le sigue la correspondiente bajada, no existiendo más que un pico. Más todavía, se observa que las UT son las que poseen el segundo pico más pronunciado. Se debe notar que el perfil del ozono está relacionado con los niveles de NO y las reacciones fotoquímicas. En todas las estaciones se produce un aumento de la línea de base o suelo durante el fin de semana, claramente imputable a la reducción del tráfico y con ello la concentración de NO, por lo cual, se elimina menos ozono.



En cuanto a los valores de las gráficas del Anexo 7.3.3, obtenidas cuando el criterio que se viene utilizando, desviación estándar/media, es máximo, se observa que, en todos los casos excepto uno, la concentración de ozono es más baja para las estaciones de medida tratadas anteriormente. También el perfil mucho más irregular. Ambas circunstancias hacen pensar que el modelo más real del PLI es el obtenido en primer lugar.

La Casa de Campo es el caso excepcional citado (Figura 4.4). Examinadas con detalle las medidas utilizadas para su elaboración, se detectó un conjunto de 13 cuyo valor era alrededor de dos órdenes de magnitud superior al resto. Las causas podían ser un registro erróneo de los datos por el sistema de vigilancia o al pasarlo al documento de Excel, en los que se ha desplazado el decimal dando valores de una magnitud mucho mayor, y muy dispares de los dos valores horarios tanto anterior como posterior. Se corrigieron situando las comas correspondientes a los números que por tendencia y lógica podemos deducir que son así, dando el resultado de la Figura 4.5.

En resumen, los valores tan grandes, nada que ver con los datos tanto anteriores como posteriores nos muestran que se tratan de un claro error que se da a la

hora de almacenar o procesar los datos. Esta sería una aplicación interesante del modelo que se propone, detectar fallos en las medidas.

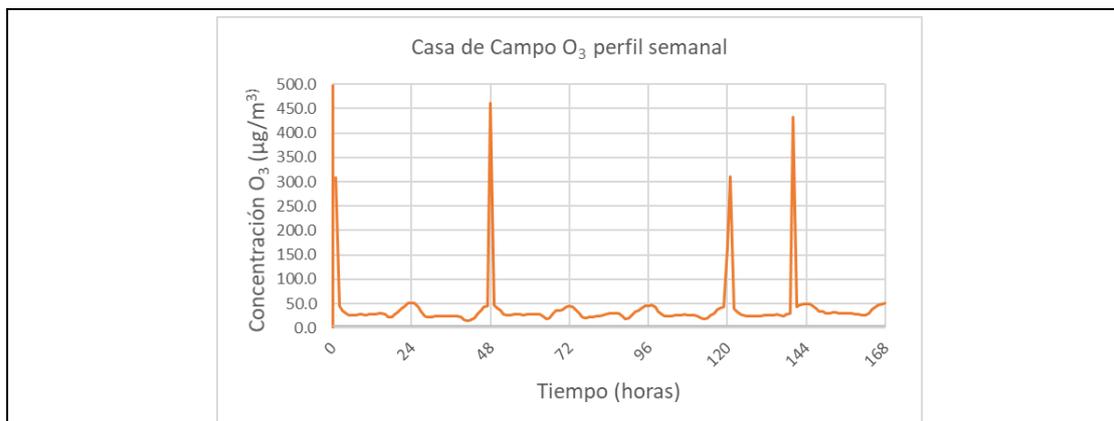


Figura 4.4. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Casa de Campo.

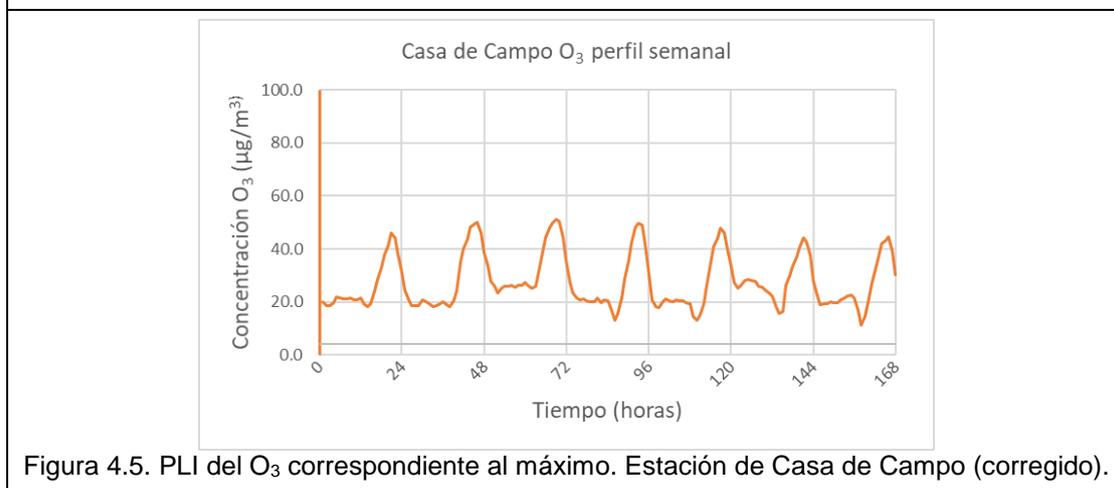


Figura 4.5. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Casa de Campo (corregido).

### 4.3 Estudio riguroso de los niveles de óxido nítrico

Tras la obtención del Patrón local de inmisión a partir del mínimo de la desviación estándar/media, se analiza el comportamiento NO, con el mismo detalle espacial y temporal que el del O<sub>3</sub>.

Para la estación de Escuelas Aguirre se obtuvo el PLI, con el criterio que se viene utilizando (desviación estándar/media), según muestra la Figura AIV.1. En ella se aprecia que a partir de las 7 de la mañana comienza el aumento de la concentración de NO, dando el punto máximo en torno a las 9 de la mañana, posiblemente de la mano del aumento de desplazamientos que tienen lugar desde las 6-7 a.m. Hacia las 11 comienza a disminuir la concentración de una forma notoria, después tiene lugar otro aumento en torno a las 6-7 p.m., mucho menos acusado que el de primera hora del día, variando el pico en función del día de la semana, pero bastante regularmente a lo largo de los días laborales.

Por el contrario, en el fin de semana se produce una disminución de la concentración del contaminante, suavizándose y alcanzando unos valores que no superan los  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tienen lugar subidas y bajadas de la concentración, pero en un rango mucho menor y sin claras pautas horarias, seguramente porque el tráfico está más repartido a lo largo del día. También se produce un aumento de los mínimos en el fin de semana, es decir, el suelo de la gráfica asciende.

Entre semana existen unos valores máximos de  $20\text{-}25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación de Vallecas (Figura AIV.2), mientras que durante el fin de semana los valores son muy próximos a cero, mostrando una ligera elevación el sábado. Comienza el crecimiento a las 7, alcanzándose los valores máximos sobre las 8-9 de la mañana. El fin de semana decrece, siendo los valores más estables y repartiéndose los niveles de NO con valores más altos por la mañana y más bajos el resto del día.

Frente al carácter urbano de la anterior, la de tipo suburbano como es Casa de Campo (Figura AIV.3), destacar que los niveles son muy próximos a 0 durante la mayor parte de los días de la semana, salvo de forma puntual una variación por un aumento considerable que comienza a las 8 de la mañana en forma de pico hasta alcanzar una concentración de aproximadamente  $14\text{-}15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en torno a las 10 de la mañana. Lo reflejado anteriormente se cumple de lunes a viernes, mientras que los fines de semana (refiriéndose como fin de semana a sábado y domingo) presentan ese aumento en pico mucho menos pronunciado y unos niveles máximos mucho menores, entre  $4\text{-}5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Estos aumentos se deben por el tránsito de los vehículos. El sábado y domingo hay una reducción del tráfico y como consecuencia una disminución las emisiones de NO.

Dado que el NO depende fuertemente del tráfico que exista en las cercanías de la zona de medida se encuentran los valores de NO en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  más altos en las estaciones de tipo UT, después con casi  $1/3$  en proporción a los valores máximos de las estaciones de este tipo se sitúan las UF y finalmente con valores bastante bajos, debido a que carecen de tráfico, están las SUB.

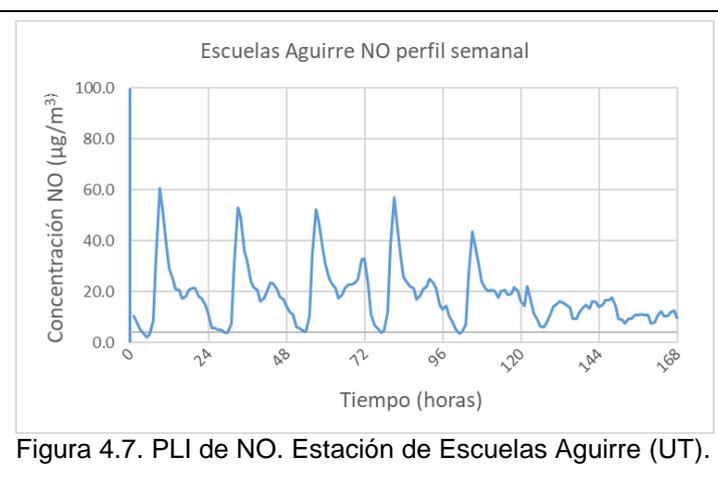
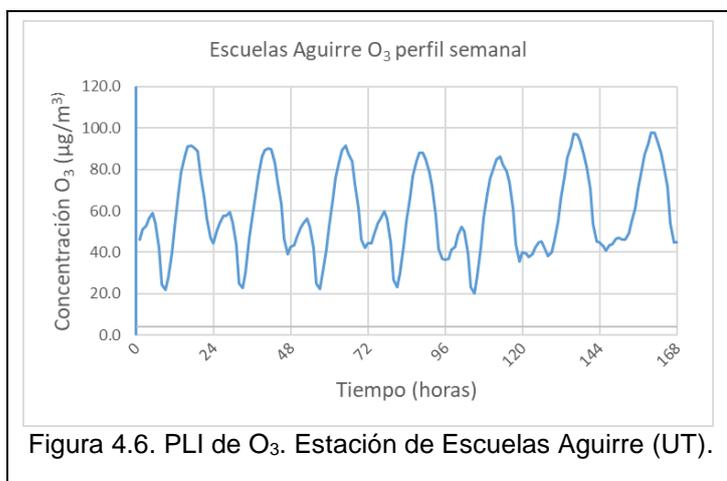
#### 4.4 Interacción ozono-óxido nítrico

En cuanto las estaciones de tipo UT (Figura 4.6 y 4.7), a primera vista parecería que no hay relación entre ambos contaminantes. Sin embargo, se aprecia cierta coincidencia entre los niveles bajos de NO y altos de O<sub>3</sub>, esto se podría deber a que el NO reacciona con el O<sub>3</sub> dando lugar NO<sub>2</sub>, por lo que disminuye la concentración de O<sub>3</sub>, pero si no hay mucho NO, esa disminución es mucho menor. Durante el fin de semana, tiene lugar una subida de la línea base del O<sub>3</sub> y de los valores máximos, esto se debe a la disminución de los niveles de NO<sub>x</sub> (Agencia europea del medio ambiente, 2016). Es decir, el fin de semana, la concentración es mayor y los niveles de NO<sub>x</sub> menores. Por lo tanto, existe una relación entre la concentración de ozono y la concentración de NO.

Por otro lado, las estaciones de tipo UF (Figuras 4.8 y 4.9) presentan características similares al tipo de estación anterior. Cuando se produce una disminución de NO se da un aumento de O<sub>3</sub>, debido a que este no se consume oxidando a las especies NO y NO<sub>2</sub>. También el comportamiento es similar el fin de semana.

Por último, se encuentra que las estaciones SUB (Figuras 4.10 y 4.11) siguen un patrón parecido, en estas últimas incluso los valores de O<sub>3</sub> son más altos y lo de NO más bajos, lo que podría estar causado por el transporte del O<sub>3</sub> por el viento.

En los tres tipos de estación se observa una relación entre los picos crecida de NO y bajada de O<sub>3</sub>.



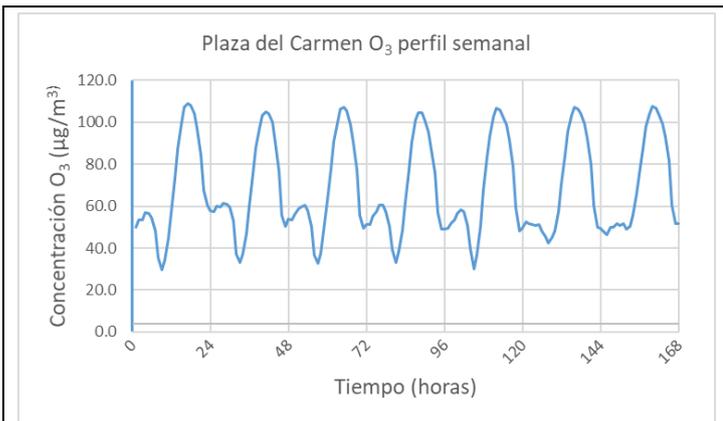


Figura 4.8. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de Plaza del Carmen (UF).

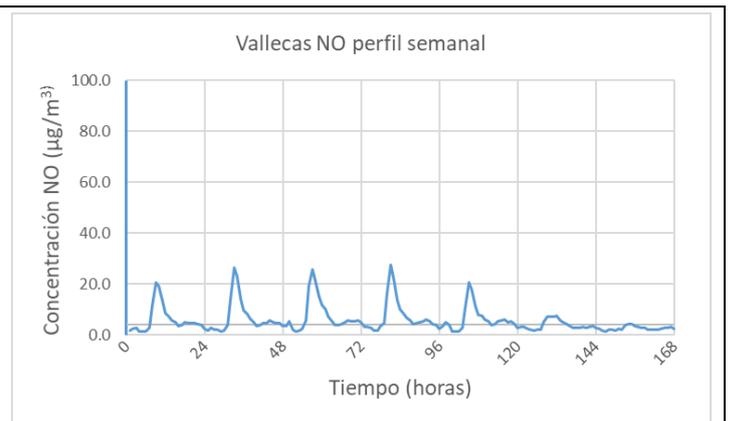


Figura 4.9. PLI de NO. Estación de Vallecas (UF).

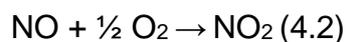


Figura 4.10. PLI de O<sub>3</sub>. Estación Casa de Campo (SUB).

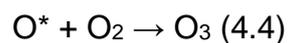


Figura 4.11. PLI de NO. Estación de Casa de Campo (SUB).

Cuando las concentraciones de las especies se expresan en moles, la relación entre ellas se hace más patente como muestra la Figura 4.12. En ella, en primer lugar, se aprecia que las concentraciones son del mismo orden de magnitud. Así mismo, se sabe que primero se produce la reacción



rápida, y que una de las vías de formación de O<sub>3</sub>, junto con aquella en que intervienen VOC y otras especies productoras de radicales orgánicos, es:



lo que confirma que la “simetría especular” que se observa en la figura. En ella la presencia de NO hace que la concentración de NO<sub>2</sub> crezca y la de O<sub>3</sub> disminuya, y a la inversa.

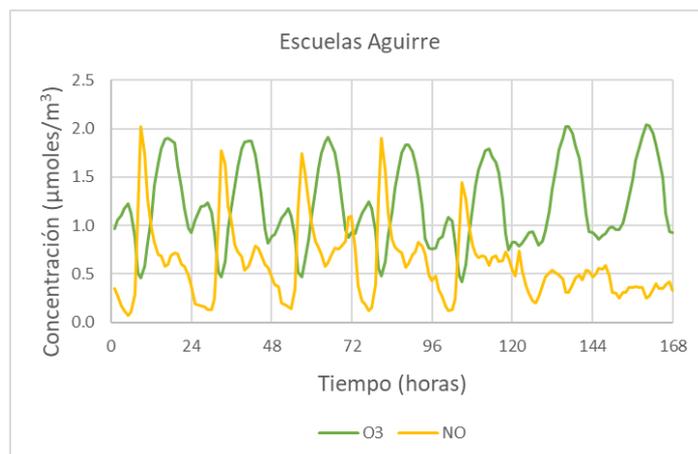


Figura 4.12 Patrones locales de inmisión de O<sub>3</sub> y NO, μmoles/m<sup>3</sup>.

## 5. Conclusiones

El análisis detallado de los resultados obtenidos permite extraer las siguientes conclusiones:

1. Los umbrales legales fijados por la UE y la OMS, se superan en todas las estaciones de medida a lo largo del año salvo en invierno. De acuerdo con diferentes estudios estos hechos suponen un alto riesgo para la población de la ciudad de Madrid y alrededores.

Se han encontrado resultados aparentemente anómalos, existen grandes diferencias entre el número de episodios de EM que están muy próximas. Para tratar de encontrar explicación se ha estudiado con alto grado de detalle la evolución de los niveles de O<sub>3</sub> y NO, encontrando que:

2. El ozono posee una estacionalidad muy marcada, dándose el número más alto de episodios de contaminación en verano. Lo cual corrobora que este contaminante secundario ve influenciada su concentración por factores meteorológicos como la RS, la T y la estabilidad atmosférica.

3. El ozono a lo largo del día se ve influenciado por el aumento del tráfico, reduciéndose su concentración en las horas de máxima influencia de circulación de vehículos. También por la cercanía o lejanía de lugares de alta concentración de tráfico, así en los más alejados del centro de la ciudad los niveles son mucho más elevados.

4. La concentración de O<sub>3</sub> disminuye en presencia de óxido nítrico, por la reacción de producción de dióxido de nitrógeno y oxígeno. El óxido nítrico posee sus niveles más elevados cuando el tráfico es mayor, generando así una disminución del ozono.

5. Los fines de semana, aumenta el ozono debido a que los altos niveles de óxido nítrico son menores. Por ello, aunque disminuyen las emisiones por tráfico, la contaminación se mantiene en niveles importantes.

En resumen, los niveles de ozono dependen de factores naturales, como los meteorológicos, y también por factores antrópicos, como las emisiones del tráfico.

## **6. Bibliografía**

AGENCIA EUROPEA DEL MEDIO AMBIENTE, 2016. Ozono troposférico [online] Available from <<https://www.eea.europa.eu/es/publications/92-828-3351-8/page005.html>> [1 May 2018].

ALBERT L., 2004. Contaminación ambiental. Origen, clases, fuentes y efectos. Revista de la facultad de salud pública y nutrición, pp. 37-52.

ARÁNGUEZ E., ORDÓÑEZ J.M., SERRANO J., ARAGONÉS N., FERNÁNDEZ-PATIER R., GANDARILLAS A., GALÁN I., 1999. Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. Revista Española de Salud Pública, 73(2), pp. 123-132.

ATKINSON, R.W., CAREY, I.M., KENT, A.J., VAN STAA, T.P., ANDERSON, H.R. and COOK, D.G., 2013. Long-Term Exposure to Outdoor Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Diseases. Epidemiology, 24(1), pp. 44-53.

AYUNTAMIENTO DE MADRID, 2015. Portal web de Calidad del Aire del Ayuntamiento de Madrid: Episodios de Contaminación [online] Available from <<http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/cal aire/Episodios/index.html>> [30 May 2018].

AYUNTAMIENTO DE MADRID, 2016. Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid: Calidad del aire: Estaciones de control [online] Available from <<https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnnextoid=9e42c176313eb410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&v>>

gnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD> [04 April 2018].

BALLESTER F., 2005. Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), pp. 159-175.

BARBADILLO E., 2015. Metodología para la obtención de patrones de inmisión espacio temporales. TFG. Universidad de Alcalá de Henares, Facultad de Ciencias Ambientales.

BRAUER, M., FREEDMAN, G., FROSTAD, J., VAN DONKELAAR, A., MARTIN, R.V., DENTENER, F., VAN DINGENEN, R., ESTEP, K., AMINI, H., APTE, J.S., BALAKRISHNAN, K., BARREGARD, L., BRODAY, D., FEIGIN, V., GHOSH, S., HOPKE, P.K., KNIBBS, L.D., KOKUBO, Y., LIU, Y., MA, S., MORAWSKA, L., TEXCALAC SANGRADOR, J.L., SHADDICK, G., ANDERSON, H.R., VOS, T., FOROUZANFAR, M.H., BURNETT, R.T. and COHEN, A., 2016. Ambient Air Pollution Exposure Estimation for the Global Burden of Disease 2013. *Environmental science & technology*, 50(1), pp. 79-88.

CAMPO E., 2014. Estudio de los Niveles de Inmisión de Contaminantes Atmosféricos en la Comunidad de Madrid. TFG. Universidad de Alcalá de Henares, Facultad de Ciencias Ambientales.

DIRECCIÓN GENERAL DE SOSTENIBILIDAD Y CONTROL AMBIENTAL, SUBDIRECCIÓN GENERAL DE SOSTENIBILIDAD Y SERVICIO DE PROTECCIÓN DE LA ATMÓSFERA, 2013. Episodios de contaminación atmosférica: Procedimientos de Información y Alerta a la Población del municipio de Madrid (Síntesis). Área de Gobierno de Medio Ambiente y Movilidad, pp.1-12.

GARCÍA-CAMPAÑA, A.M., BAEYENS W., ZHANG X., ALÉS F., GÁMIZ L., 2001. Quimioluminiscencia: una interesante alternativa para la detección analítica en sistemas de flujo. *Ars Pharmaceutica*,42(1), pp. 81-107.

GOBIERNO DE ARAGON, 2018. La calidad del aire en Aragón: El ozono estratosférico y el ozono troposférico (o superficial) [online] Available from <[http://www.aragonaire.es/ozone.php?n\\_action=types](http://www.aragonaire.es/ozone.php?n_action=types)> [29 May 2018].

KHANIABADI, Y.O., GOUDARZI, G., DARYANOOSH, S.M., BORGINI, A., TITTARELLI, A. and DE MARCO, A., 2017. Exposure to PM10, NO2, and O-3

and impacts on human health. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(3), pp. 2781-2789.

MINISTERIO DE LA PRESIDENCIA, 2011. Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire [online] Available from <<https://www.boe.es/boe/dias/2011/01/29/pdfs/BOE-A-2011-1645.pdf>> [21 January 2018].

MYHRE, G., AAS, W., CHERIAN, R., COLLINS, W., FALUVEGI, G., FLANNER, M., FORSTER, P., HODNEBROG, O., KLIMONT, Z., LUND, M.T., MUELMESTAEDT, J., MYHRE, C.L., OLIVIE, D., PRATHER, M., QUAAS, J., SAMSET, B.H., SCHNELL, J.L., SCHULZ, M., SHINDELL, D., SKEIE, R.B., TAKEMURA, T. and TSYRO, S., 2017. Multi-model simulations of aerosol and ozone radiative forcing due to anthropogenic emission changes during the period 1990-2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(4), pp. 2709-2720.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, 2006. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. pp. 14-16.

SOUSA, S.I.V., MARTINS, F.G., ALVIM-FERRAZ, M.C.M. and PEREIRA, M.C., 2007. Multiple linear regression and artificial neural networks based on principal components to predict ozone concentrations. *Environmental Modelling & Software*, 22(1), pp. 97-103.

STEVENSON, D.S., DENTENER, F.J., SCHULTZ, M.G., ELLINGSEN, K., VAN NOIJE, T., WILD, O., ZENG, G., AMANN, M., ATHERTON, C.S., BELL, N., BERGMANN, D.J., BEY, I., BUTLER, T., COFALA, J., COLLINS, W.J., DERWENT, R.G., DOHERTY, R.M., DREVET, J., ESKES, H.J., FIORE, A.M., GAUSS, M., HAUGLUSTAINE, D.A., HOROWITZ, L.W., ISAKSEN, I., KROL, M.C., LAMARQUE, J.F., LAWRENCE, M.G., MONTANARO, V., MULLER, J.F., PITARI, G., PRATHER, M.J., PYLE, J.A., RAST, S., RODRIGUEZ, J.M., SANDERSON, M.G., SAVAGE, N.H., SHINDELL, D.T., STRAHAN, S.E., SUDO, K. and SZOPA, S., 2006. Multimodel ensemble simulations of present-day and near-future tropospheric ozone. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 111(D8), pp. 1-23.

STEVENSON, D.S., YOUNG, P.J., NAIK, V., LAMARQUE, J.-., SHINDELL, D.T., VOULGARAKIS, A., SKEIE, R.B., DALSOREN, S.B., MYHRE, G., BERNTSEN, T.K., FOLBERTH, G.A., RUMBOLD, S.T., COLLINS, W.J., MACKENZIE, I.A., DOHERTY, R.M., ZENG, G., VAN NOIJE, T P C, STRUNK, A., BERGMANN, D., CAMERON-SMITH, P., PLUMMER, D.A., STRODE, S.A., HOROWITZ, L., LEE, Y.H., SZOPA, S., SUDO, K., NAGASHIMA, T., JOSSE, B., CIONNI, I., RIGHI, M., EYRING, V., CONLEY, A., BOWMAN, K.W., WILD, O. and ARCHIBALD, A., 2013. Tropospheric ozone changes, radiative forcing and attribution to emissions in the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(6), pp. 3063-3085.

STOHL, A., AAMAAS, B., AMANN, M., BAKER, L.H., BELLOUIN, N., BERNTSEN, T.K., BOUCHER, O., CHERIAN, R., COLLINS, W., DASKALAKIS, N., DUSINSKA, M., ECKHARDT, S., FUGLESTVEDT, J.S., HARJU, M., HEYES, C., HODNEBROG, O., HAO, J., IM, U., KANAKIDOU, M., KLIMONT, Z., KUPIAINEN, K., LAW, K.S., LUND, M.T., MAAS, R., MACINTOSH, C.R., MYHRE, G., MYRIOKEFALITAKIS, S., OLIVIE, D., QUAAS, J., QUENNEHEN, B., RAUT, J.-., RUMBOLD, S.T., SAMSET, B.H., SCHULZ, M., SELAND, O., SHINE, K.P., SKEIE, R.B., WANG, S., YTTRI, K.E. and ZHU, T., 2015. Evaluating the climate and air quality impacts of short-lived pollutants. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(18), pp. 10529-10566.

## 7.Anexos

7.Anexos .....	31
Anexo 7.1 Códigos estaciones .....	34
Anexo 7.2 Magnitudes, unidades y técnicas de medida.....	35
Anexo 7.3 Ozono.....	36
7.3.1 Promedio de los datos formando el modelo anual:.....	36
7.3.2 Modelo de semana en la que hay variación mínima del indicador: ...	38
7.3.3 Modelo de semana en la que hay variación máxima del indicador:...	40
Anexo 7.4 Óxido nítrico .....	42
7.4.1 Modelo de semana en la que hay variación mínima del indicador: ...	42
7.4.2 Modelo de semana en la que hay variación mínima del indicador: ...	43
Anexo 7.5 Relación ozono y óxido nítrico .....	44
7.5.1 Resta de los moles de O <sub>3</sub> y NO .....	44
7.5.2 División de los moles de O <sub>3</sub> y NO .....	45
Anexo 7.6 Episodios de Contaminación Atmosférica .....	46
7.6.1 Introducción .....	46
7.6.2 Protocolo de actuación para episodios de contaminación ozono en Municipio de Madrid.....	47
Anexo 7.7 Guía de calidad del aire de la OMS y objetivo intermedio para el ozono.....	50
Anexo 7.8 Umbrales de ozono, implantación de medidas fijas y documentación del emplazamiento de las estaciones.....	51

### Índice tablas:

Tabla AI.1 Código correspondiente a las estaciones .....	34
Tabla AII.1 Código correspondiente a las estaciones .....	35
Tabla AVI.1 Umbrales de alerta .....	46
Tabla AVII.1. Guía de calidad del aire de la OMS y objetivo intermedio para el ozono: concentraciones de 8 horas.....	50
Tabla AVIII.1 Umbrales a largo plazo.....	51
Tabla AVIII.2 Umbrales a corto plazo.....	52
Tabla AVIII.3. Macroimplantación de medidas fijas para estaciones urbanas..	52

Tabla AVIII.4. Macroimplantación de medidas fijas para estaciones suburbanas .....	53
------------------------------------------------------------------------------------	----

**Índice figuras:**

Figura AIII.1. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Barrio del Pilar (UT). .....	36
Figura AIII.3. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación C/Farolillo (UF). .....	36
Figura AIII.2. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Escuelas Aguirre (UT). .....	36
Figura AIII.4. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Plaza del Carmen (UF). .....	36
Figura AIII.5. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Casa de campo (SUB). .....	37
Figura AIII.6. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación El Pardo (SUB). .....	37
Figura AIII.7. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Parque Juan Carlos I (SUB). .....	37
Figura AIII.8. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de Barrio del Pilar (UT). .....	38
Figura AIII.10. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de C/Farolillo (UF). .....	38
Figura AIII.9. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de Escuelas Aguirre (UT). .....	38
Figura AIII.11. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de Plaza del Carmen (UF). .....	38
Figura AIII.12. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de Casa de campo (SUB). .....	39
Figura AIII.13. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de El Pardo (SUB). .....	39
Figura AIII.14. PLI de O <sub>3</sub> . Estación de Parque Juan Carlos I (SUB). .....	39
Figura AIII.15. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Barrio del Pilar (UT). .....	40
Figura AIII.17. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de C/Farolillo (UF). .....	40
Figura AIII.16. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Escuelas Aguirre (UT). .....	40
Figura AIII.18. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Plaza del Carmen (UF). .....	40
Figura AIII.19. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Casa de campo (SUB). .....	41
Figura AIII.20. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de El Pardo (SUB). .....	41

Figura AIII.21. PLI del O <sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Parque Juan Carlos I (SUB). .....	41
Figura AIV.1. PLI de NO. Estación de Escuelas Aguirre (UT). .....	42
Figura AIV.2. PLI de NO. Estación de Vallecas (UF). .....	42
Figura AIV.3. PLI de NO. Estación de Casa de Campo (SUB). .....	42
Figura AIV.4. PLI de NO correspondiente al máximo. Estación de Escuelas Aguirre (UT). .....	43
Figura AIV.5. PLI de NO correspondiente al máximo. Estación de Vallecas (UF). .....	43
Figura AIV.6. PLI de NO correspondiente al máximo. Estación de Casa de Campo (SUB). .....	43
Figura AV.1. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una resta de la concentración de O <sub>3</sub> y NO en la estación de Escuelas Aguirre. ....	44
Figura AV.2. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una resta de la concentración de O <sub>3</sub> y NO en las estaciones de Plaza del Carmen y Vallecas, respectivamente. ....	44
Figura AV.3. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una resta de la concentración de O <sub>3</sub> y NO en la estación de Casa de Campo. ....	44
Figura AV.4. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una división de la concentración de O <sub>3</sub> y NO en la estación de Escuelas Aguirre. ....	45
Figura AV.5. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una división de la concentración de O <sub>3</sub> y NO en las estaciones de Plaza del Carmen y Vallecas, respectivamente. ....	45
Figura AV.6. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una división de la concentración de O <sub>3</sub> y NO en la estación de Casa de Campo. ....	45

## Anexo 7.1 Códigos estaciones

Tabla AI.1 Código correspondiente a las estaciones. Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2016).

28079003 28079035(*)	Pza. del Carmen	* Código desde enero 2011
28079004	Pza. de España	
28079005 28079039(*)	Barrio del Pilar	* Código desde enero 2011
28079006	Pza. Dr. Marañón	Baja.- 27/11/2009 (08:00 h.)
28079007	Pza. M. de Salamanca	Baja.- 30/12/2009 (14:00 h.)
28079008	Escuelas Aguirre	
28079009	Pza. Luca de Tena	Baja.- 07/12/2009 (08:00 h.)
28079010 28079038(*)	Cuatro Caminos	* Código desde enero 2011
28079011	Av. Ramón y Cajal	
28079012	Pza. Manuel Becerra	Baja.- 30/12/2009 (14:00 h.)
28079013 28079040(*)	Vallecas	* Código desde enero 2011
28079014	Pza. Fdez. Ladreda	Baja.- 02/12/2009 (09:00 h.)
28079015	Pza. Castilla	Baja.- 17/10/2008 (11:00 h.)
28079016	Arturo Soria	
28079017	Villaverde Alto	
28079018	C/ Farolillo	
28079019	Huerta Castañeda	Baja.- 30/12/2009 (13:00 h.)
28079020 28079036(*)	Moratalaz	* Código desde enero 2011
28079021	Pza. Cristo Rey	Baja.- 04/12/2009 (14:00 h.)
28079022	Pº. Pontones	Baja.- 20/11/2009 (10:00 h.)
28079023	Final C/ Alcalá	Baja.- 30/12/2009 (14:00 h.)
28079024	Casa de Campo	
28079025	Santa Eugenia	Baja.- 16/11/2009 (10:00 h.)
28079026	Urb. Embajada (Barajas)	Baja.- 11/01/2010 (09:00 h.)
28079027	Barajas	
28079047	Méndez Álvaro	Alta.- 21/12/2009 (00:00 h.)
28079048	Pº. Castellana	Alta.- 01/06/2010 (00:00 h.)
28079049	Retiro	Alta.- 01/01/2010 (00:00 h.)
28079050	Pza. Castilla	Alta.- 08/02/2010 (00:00 h.)
28079054	Ensanche Vallecas	Alta.- 11/12/2009 (00:00 h.)
28079055	Urb. Embajada (Barajas)	Alta.- 20/01/2010 (15:00 h.)
28079056	Pza. Fdez. Ladreda	Alta.- 18/01/2010 (12:00 h.)
28079057	Sanchinarro	Alta.- 24/11/2009 (00:00 h.)
28079058	El Pardo	Alta.- 30/11/2009 (13:00 h.)
28079059	Parque Juan Carlos I	Alta.- 14/12/2009 (00:00 h.)

## Anexo 7.2 Magnitudes, unidades y técnicas de medida

Tabla All.1 Código correspondiente a las estaciones. Fuente: Ayuntamiento de Madrid (2016).

Magnitud		Abreviatura o fórmula	Unidad medida	Técnica de medida	
01	Dióxido de Azufre	SO <sub>2</sub>	µg/m <sup>3</sup>	38	Fluorescencia ultravioleta
06	Monóxido de Carbono	CO	mg/m <sup>3</sup>	48	Absorción infrarroja
07	Monóxido de Nitrógeno	NO	µg/m <sup>3</sup>	08	Quimioluminiscencia
08	Dióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>	µg/m <sup>3</sup>	08	Id.
09	Partículas < 2.5 µm	PM2.5	µg/m <sup>3</sup>	47	Microbalanza
10	Partículas < 10 µm	PM10	µg/m <sup>3</sup>	47	Id.
12	Óxidos de Nitrógeno	NOx	µg/m <sup>3</sup>	08	Quimioluminiscencia
14	Ozono	O <sub>3</sub>	µg/m <sup>3</sup>	06	Absorción ultravioleta
20	Tolueno	TOL	µg/m <sup>3</sup>	59	Cromatografía de gases
30	Benceno	BEN	µg/m <sup>3</sup>	59	Id.
35	Etilbenceno	EBE	µg/m <sup>3</sup>	59	Id.
37	Metaxileno	MXY	µg/m <sup>3</sup>	59	Id.
38	Paraxileno	PXY	µg/m <sup>3</sup>	59	Id.
39	Ortoxileno	OXY	µg/m <sup>3</sup>	59	Id.
42	Hidrocarburos totales (hexano)	TCH	mg/m <sup>3</sup>	02	Ionización de llama
43	Metano	CH <sub>4</sub>	mg/m <sup>3</sup>	02	Id.
44	Hidrocarburos no metánicos (hexano)	NMHC	mg/m <sup>3</sup>	02	Id.

## Anexo 7.3 Ozono

### 7.3.1 Promedio de los datos formando el modelo anual:

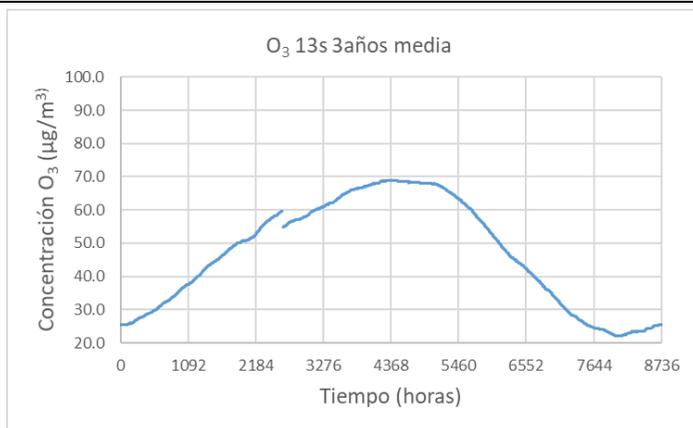


Figura AIII.1. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Barrio del Pilar (UT).



Figura AIII.3. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación C/Farolillo (UF).

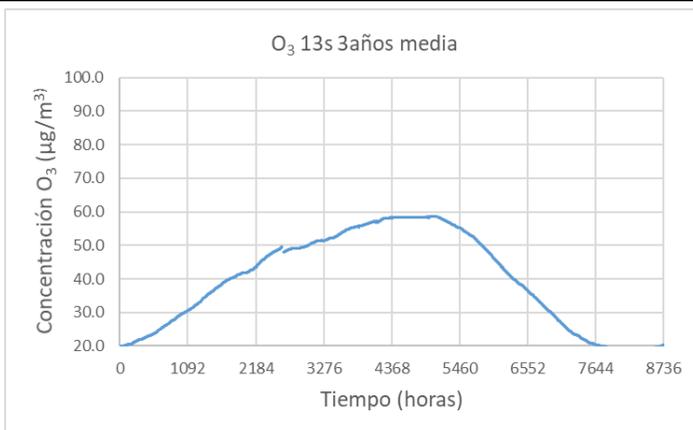


Figura AIII.2. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Escuelas Aguirre (UT).

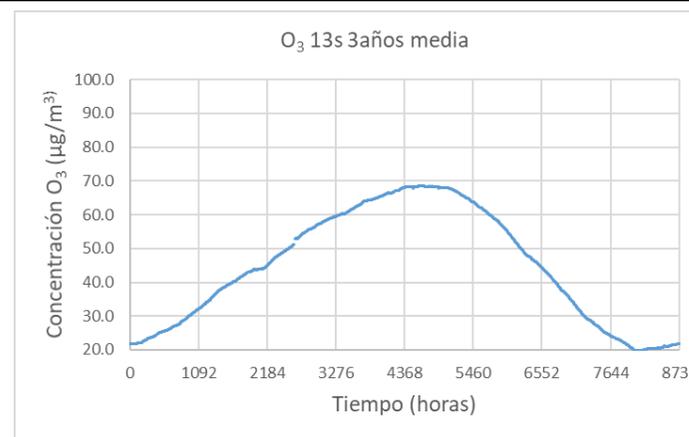


Figura AIII.4. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Plaza del Carmen (UF).



Figura AIII.5. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Casa de campo (SUB).



Figura AIII.6. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación El Pardo (SUB).

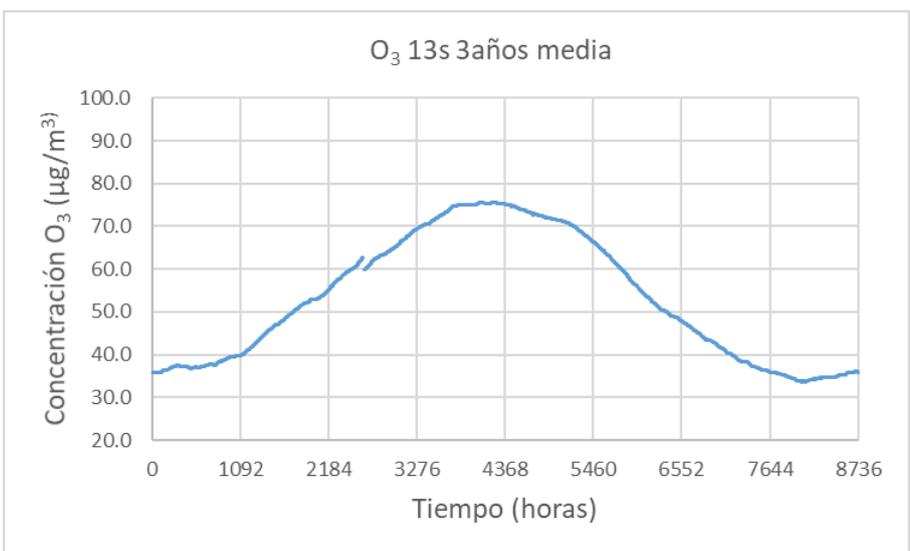


Figura AIII.7. Niveles de concentración de ozono a lo largo del año en la estación Parque Juan Carlos I (SUB).

### 7.3.2 Modelo de semana en la que hay variación mínima del indicador:

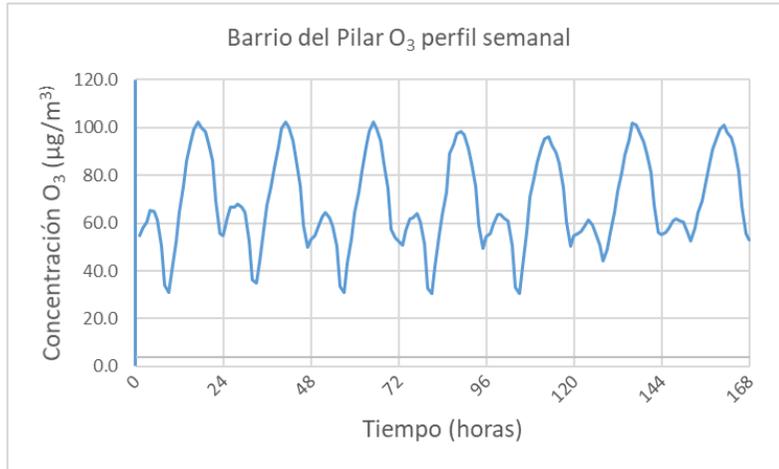


Figura AIII.8. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de Barrio del Pilar (UT).

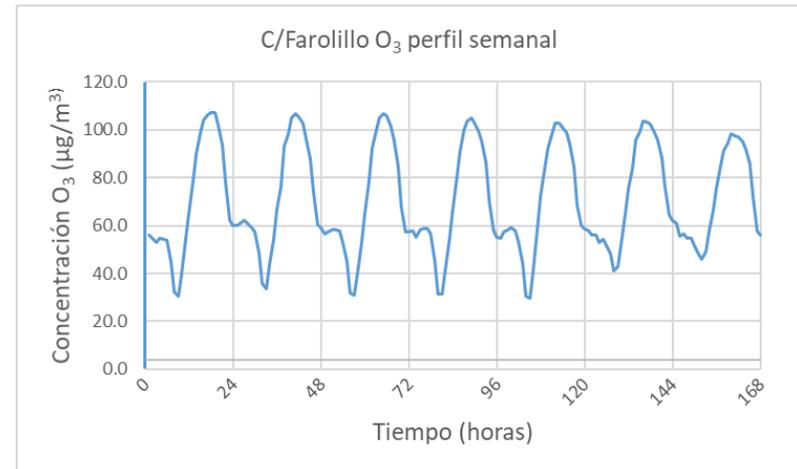


Figura AIII.10. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de C/Farolillo (UF).

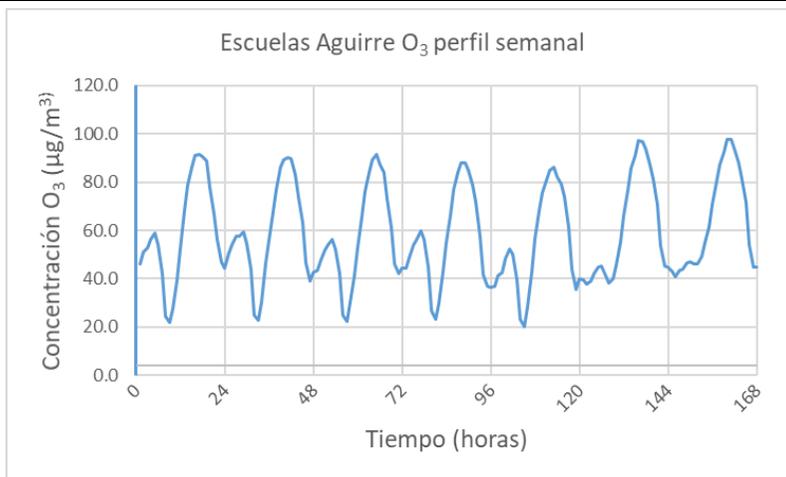


Figura AIII.9. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de Escuelas Aguirre (UT).

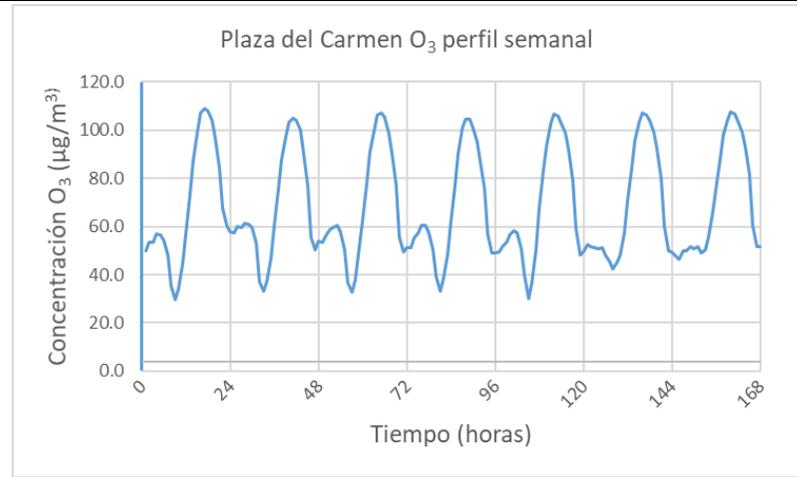


Figura AIII.11. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de Plaza del Carmen (UF).

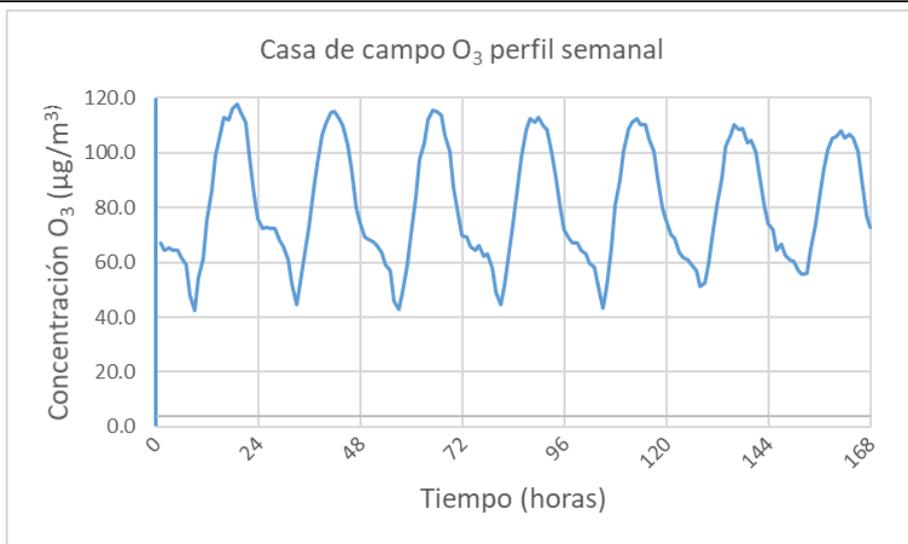


Figura AIII.12. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de Casa de campo (SUB).

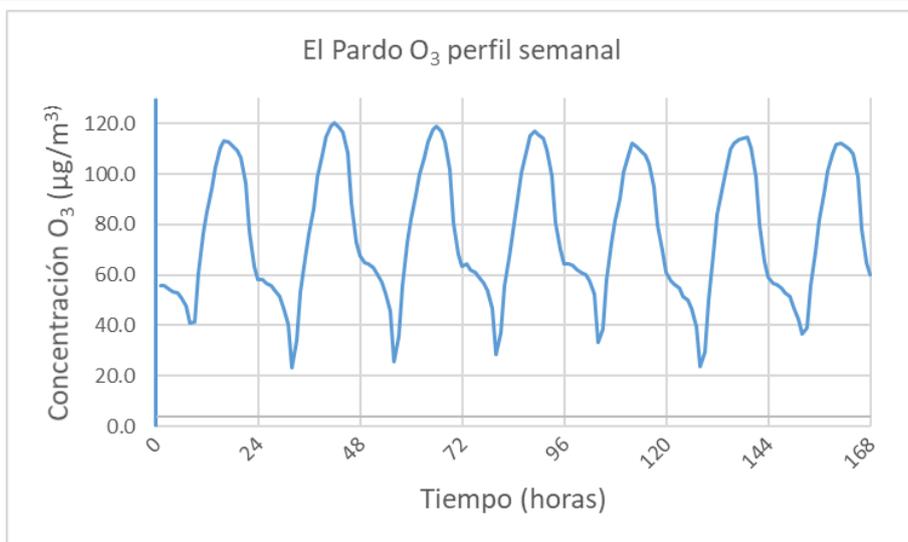


Figura AIII.13. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de El Pardo (SUB).

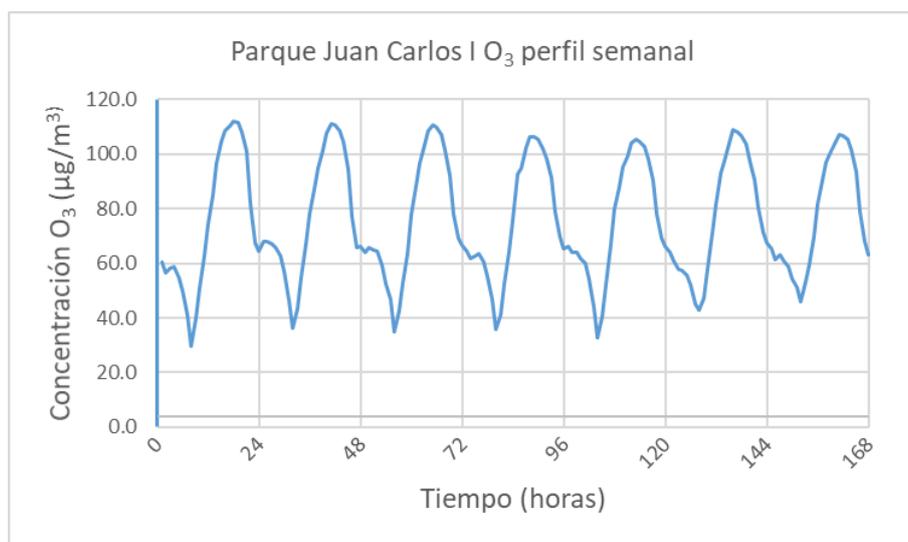


Figura AIII.14. PLI de O<sub>3</sub>. Estación de Parque Juan Carlos I (SUB).

7.3.3 Modelo de semana en la que hay variación máxima del indicador:



Figura AIII.15. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Barrio del Pilar (UT).

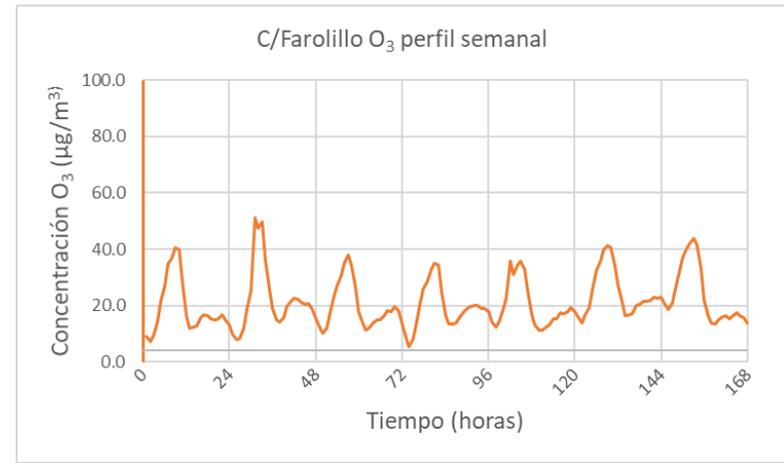


Figura AIII.17. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de C/Farolillo (UF).



Figura AIII.16. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Escuelas Aguirre (UT).

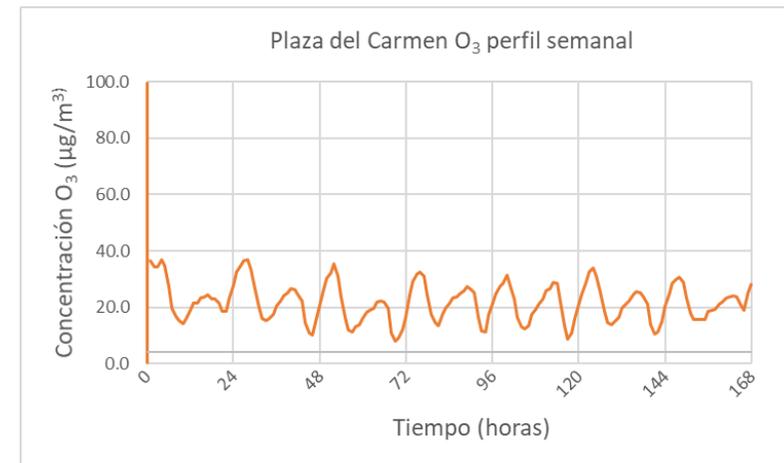


Figura AIII.18. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Plaza del Carmen (UF).

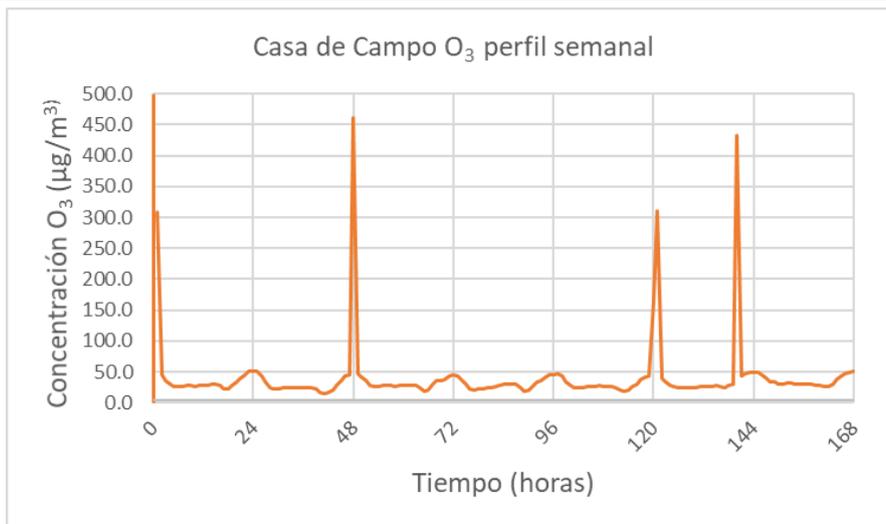


Figura AIII.19. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Casa de campo (SUB).



Figura AIII.20. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de El Pardo (SUB).

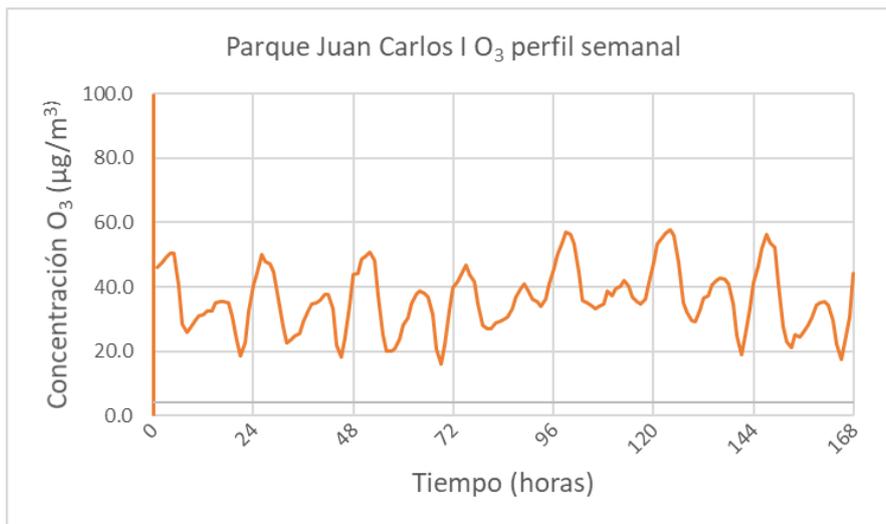


Figura AIII.21. PLI del O<sub>3</sub> correspondiente al máximo. Estación de Parque Juan Carlos I (SUB).

## Anexo 7.4 Óxido nítrico

### 7.4.1 Modelo de semana en la que hay variación mínima del indicador:



Figura AIV.1. PLI de NO. Estación de Escuelas Aguirre (UT).

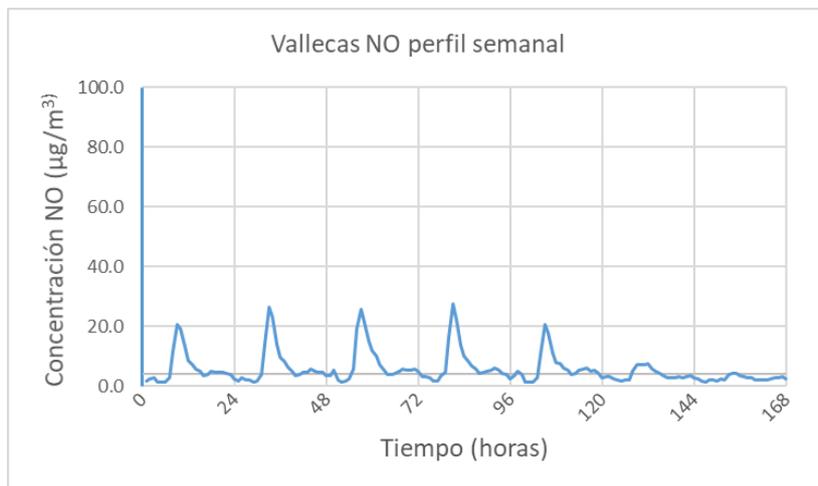


Figura AIV.2. PLI de NO. Estación de Vallecas (UF).



Figura AIV.3. PLI de NO. Estación de Casa de Campo (SUB).

7.4.2 Modelo de semana en la que hay variación mínima del indicador:

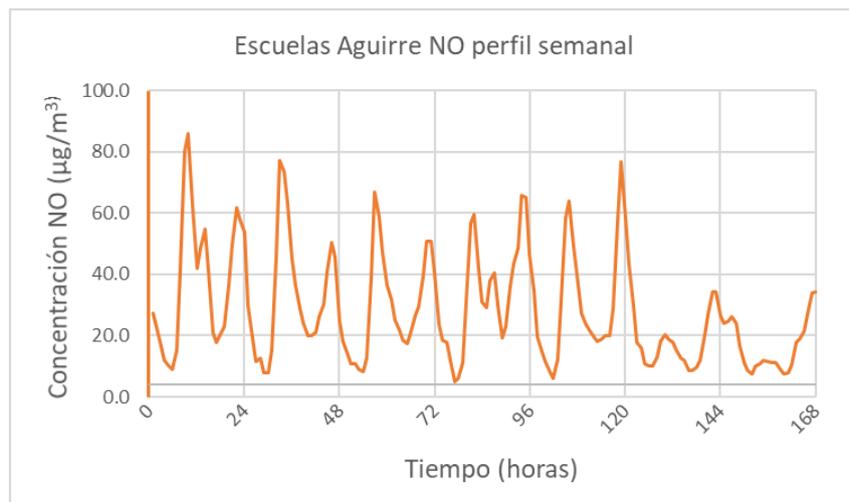


Figura AIV.4. PLI de NO correspondiente al máximo. Estación de Escuelas Aguirre (UT).

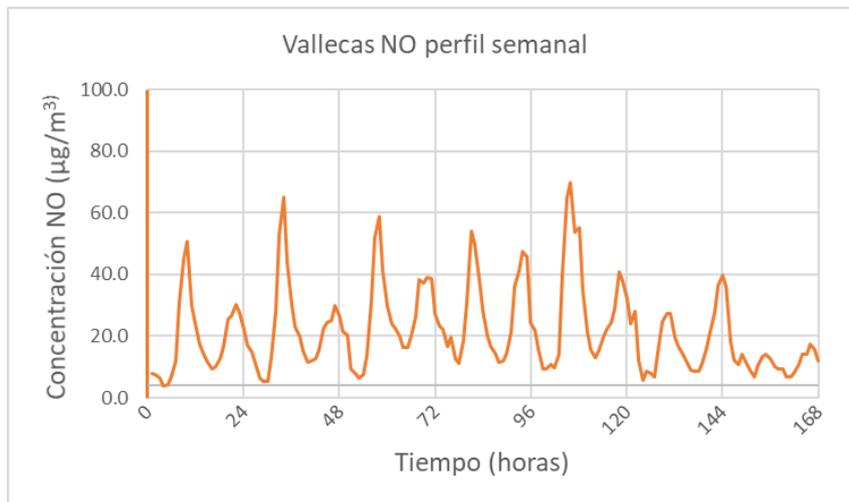


Figura AIV.5. PLI de NO correspondiente al máximo. Estación de Vallecas (UF).

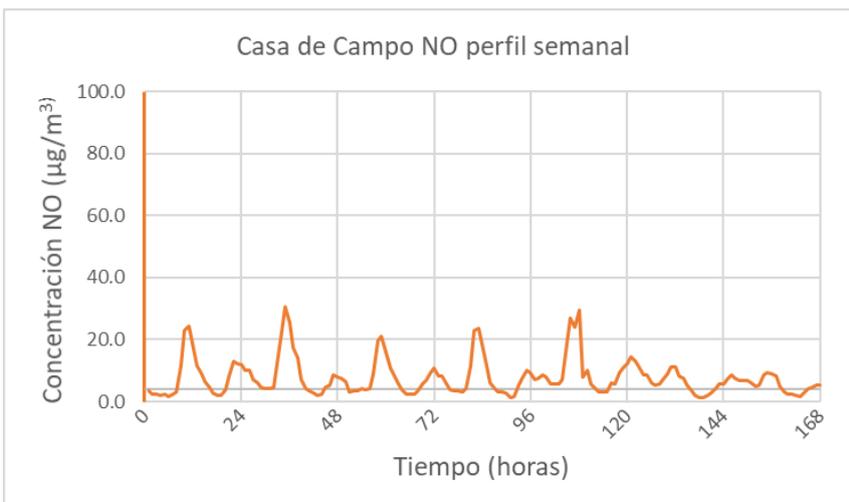


Figura AIV.6. PLI de NO correspondiente al máximo. Estación de Casa de Campo (SUB).

## Anexo 7.5 Relación ozono y óxido nítrico

### 7.5.1 Resta de los moles de O<sub>3</sub> y NO.

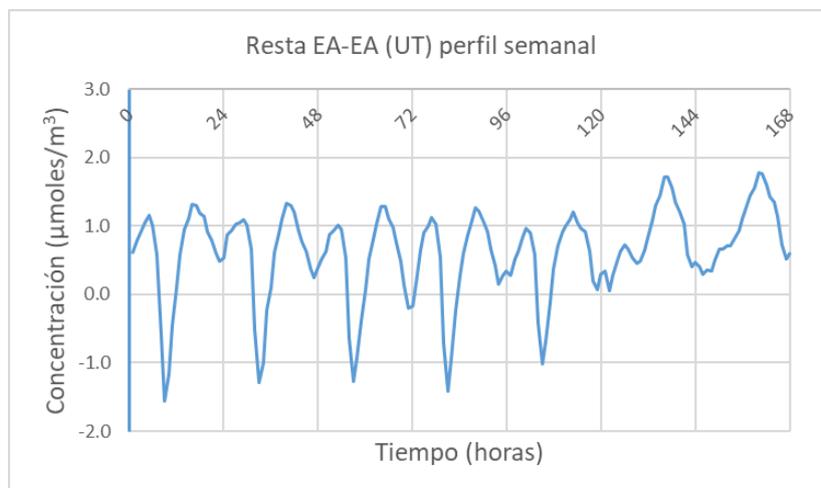


Figura AV.1. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una resta de la concentración de O<sub>3</sub> y NO en la estación de Escuelas Aguirre.

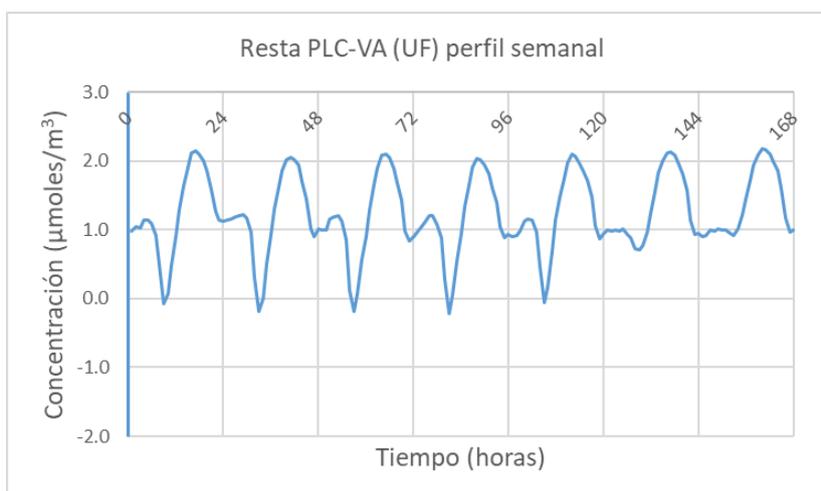


Figura AV.2. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una resta de la concentración de O<sub>3</sub> y NO en las estaciones de Plaza del Carmen y Vallecas, respectivamente.

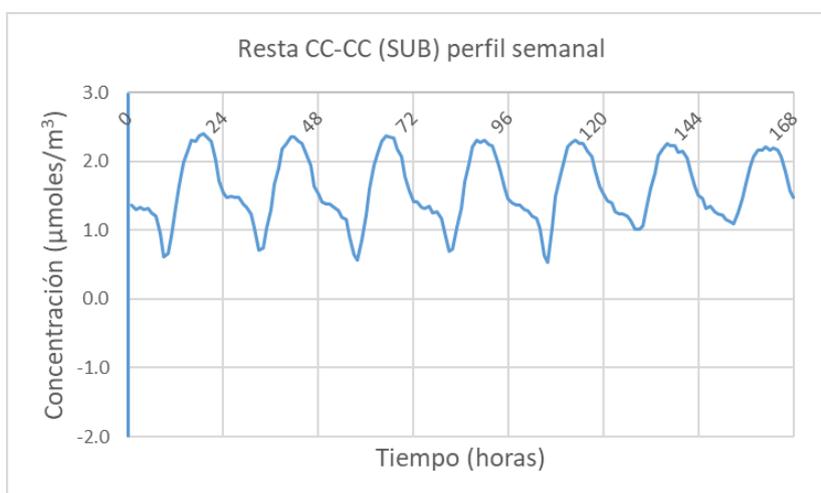


Figura AV.3. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una resta de la concentración de O<sub>3</sub> y NO en la estación de Casa de Campo.

### 7.5.2 División de los moles de O<sub>3</sub> y NO.

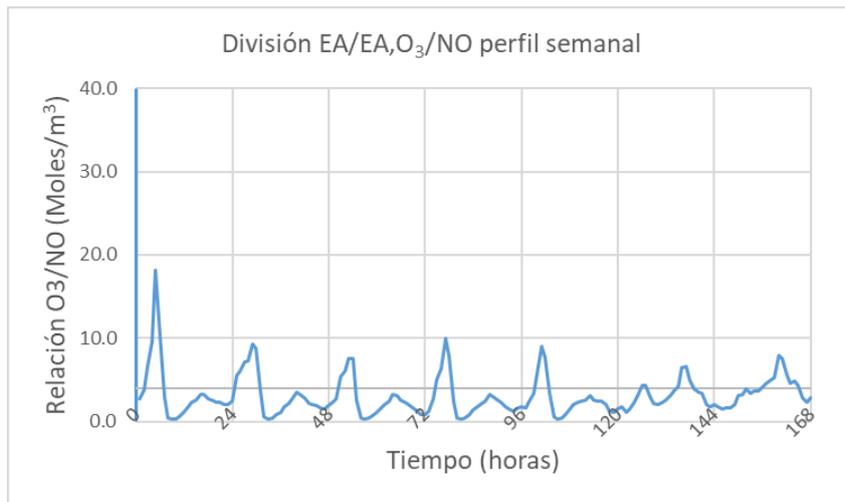


Figura AV.4. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una división de la concentración de O<sub>3</sub> y NO en la estación de Escuelas Aguirre.

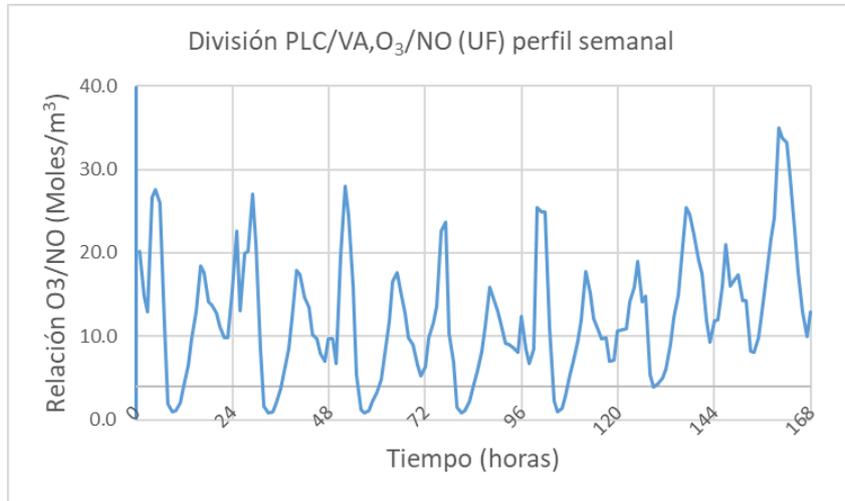


Figura AV.5. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una división de la concentración de O<sub>3</sub> y NO en las estaciones de Plaza del Carmen y Vallecas, respectivamente.

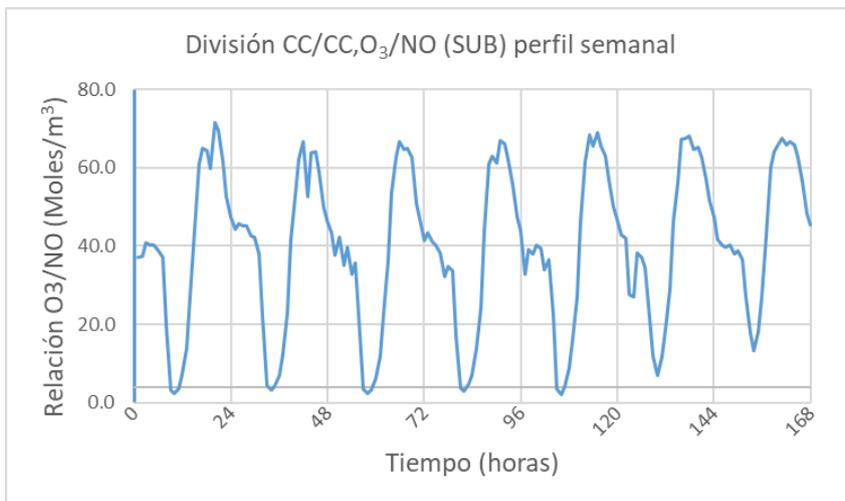


Figura AV.6. Modelo semanal del mínimo del indicador mediante una división de la concentración de O<sub>3</sub> y NO en la estación de Casa de Campo.

## **Anexo 7.6 Episodios de Contaminación Atmosférica** (Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental, 2013).

### Procedimientos de Información y Alerta a la Población del municipio de Madrid

#### 7.6.1 Introducción

El control permanente de la calidad del aire se lleva a cabo con el Sistema de Vigilancia, Predicción e Información de la Calidad del Aire que mide, en tiempo real, las concentraciones de contaminantes con el fin último de proteger la salud y el bienestar de los madrileños.

El Real Decreto 102/2011 relativo a la mejora de la calidad del aire en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono y ozono, y la Directiva 2008/50/CE relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa, obligan a las administraciones a informar a la población cuando se superen determinadas concentraciones fijadas para los distintos contaminantes.

Se entiende por umbral de alerta, el nivel a partir del cual una exposición de breve duración supone un riesgo para la salud humana que afecta al conjunto de la población y que requiere la adopción de medidas inmediatas.

Hay tres contaminantes para los cuales la legislación ha fijado umbrales de alerta: dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y ozono.

Tabla AVI.1 Umbrales de alerta. Fuente: Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental (2013).

Contaminante	Umbral de alerta
Dióxido de Azufre	3 horas consecutivas: 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un área representativa
Dióxido de Nitrógeno	3 horas consecutivas: 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un área representativa
Ozono	1 hora: 240 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Para el ozono troposférico, además del umbral de alerta existe también un umbral de información (180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante 1 hora). En ocasiones se ha excedido el umbral de información, pero nunca se ha rebasado el de alerta.

Además de las medidas de tipo estructural que conlleven una reducción de las emisiones de sus precursores, en situaciones de elevados niveles de

concentración de ozono es también necesario llevar a cabo actuaciones encaminadas a proteger a la población más vulnerable mediante medidas informativas y recomendaciones sanitarias, tal y como se contempla en el Protocolo en vigor.

#### 7.6.2 Protocolo de actuación para episodios de contaminación ozono en Municipio de Madrid.

Las concentraciones de ozono que determinan los distintos niveles de actuación son las siguientes:

- Preaviso (de carácter interno) ..... 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Información a la población ..... 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- Alerta atmosférica ..... 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

En todos los casos se trata de valores medios horarios por estación.

##### Preaviso

Si se alcanza el nivel de preaviso, el sistema envía un SMS automáticamente a la lista de distribución establecida y simultáneamente el personal de guardia se lo comunica al Jefe del Servicio de Protección de la Atmósfera, al Encargado del Sistema de Vigilancia y al Adjunto al Departamento correspondiente.

Se realizará un análisis de los datos, comprobando que los datos son válidos y estudiando la tendencia de los valores en la/s estación/es que estén alcanzando los valores más altos y además se verificara que los mecanismos previstos en caso de llegar al nivel de “Información a la población” o al de “Alerta atmosférica”, están disponibles y funcionan correctamente.

##### Información a la población

En el caso de superarse en alguna de las estaciones del Sistema de Vigilancia los 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sin sobrepasar los 240  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se comunicará a las personas, departamentos y organismos correspondientes.

Se convocará a la Comisión de Calidad del Aire de la Ciudad de Madrid si evaluada la situación por la Dirección General de Sostenibilidad y Planificación de la Movilidad es previsible que pueda superarse el umbral de alerta.

Se introducirá un anuncio de forma inmediata en la página WEB del Ayuntamiento de Madrid de forma destacada, paneles informativos, servicio de avisos SMS a móviles con recomendaciones a los sectores de población más vulnerables.

#### Alerta a la población

Si se registran valores superiores a los 240 µg/Nm<sup>3</sup> en alguna de las estaciones del Sistema de Vigilancia, se anunciará la situación de “Alerta atmosférica” y se comunicará a las personas, departamentos y organismos correspondientes.

Se convocará a la Comisión de Calidad del aire de la ciudad de Madrid.

Se introducirá un anuncio de forma inmediata en la página WEB del Ayuntamiento de Madrid de forma destacada, paneles informativos, servicio de avisos SMS a móviles con recomendaciones para el conjunto de la población.

En todos los casos se avisará al Departamento de Salud Ambiental de Madrid Salud, que activará los sistemas de información establecidos al efecto de minimizar la exposición a la población.

#### Información y adopción de medidas sanitarias ante episodios de contaminación atmosférica. coordinación de actuaciones (Madrid-salud):

El Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, establece en su artículo 20 que cuando se superen los umbrales de información o alerta o se prevea que se va a superar, las Administraciones competentes adoptarán las medidas necesarias de urgencia e informarán a la población por radio, televisión, prensa o Internet, entre otros medios posibles, de los niveles registrados o previstos y de las medidas que se vayan a adoptar. Asimismo, en su artículo 28 indica que cuando se rebase un umbral de información o de alerta, los detalles difundidos al público incluirán, entre otras, información sobre el tipo de población afectada, los posibles efectos para la salud y el comportamiento recomendado, es decir: información sobre los grupos de población de riesgo; descripción de los síntomas probables; recomendaciones sobre las precauciones que debe tener la población afectada; fuentes de información suplementaria.

También contempla prever acciones específicas destinadas a proteger los sectores más vulnerables de la población, incluidos los niños.

Se hace necesario incorporar actuaciones de información sanitaria a la población en relación con episodios de incremento de umbrales para contaminantes atmosféricos, así como la incorporación de medidas de actuación concretas para minimizar la exposición de la población, con especial incidencia a los grupos más sensibles.

La activación de este Protocolo de Coordinación de Actuaciones ante Episodios de Contaminación Atmosférica se establece en base al modelo de predicción de calidad del aire para el día de la fecha y el día siguiente (dos días en caso de fin de semana).

Así, si se prevé la superación de los umbrales de información a la población o alerta por ozono (predicción del índice de calidad del aire deficiente o mala), y una vez contrastada la información con el Servicio de Protección de la Atmosfera, se procede a la activación del sistema de alertas en salud ambiental, para lo que con carácter previo se han elaborado:

- Fichas de información y otro material divulgativo para la información a la población sobre los riesgos para la salud de estos episodios de contaminación atmosférica por ozono, la población especialmente vulnerable a sus efectos y las recomendaciones sanitarias para minimizar la exposición a este contaminante.
- Medios de comunicación establecidos para la difusión de la información.
- Catálogo de informadores clave como agentes de difusión de la información a los que remitir en primer término las recomendaciones sanitarias de minimización de la exposición, para la posterior difusión generalizada por parte de estos receptores a la población o sector relacionado.

En el caso de previsión mala para el día en curso o el fin de y se previera el nivel de alerta, se indicarían, además, las medidas de actuación o las limitaciones /prohibiciones concretas a efectos de disminuir la exposición de la población a estos niveles de contaminación atmosférica, especialmente de los colectivos de mayor sensibilidad. Así, llegado el caso, podrían valorarse la adopción de ciertas

actuaciones concretas como la prohibición de determinadas actividades al aire libre (especialmente deportivas) principalmente entre la población de riesgo.

## Anexo 7.7 Guía de calidad del aire de la OMS y objetivo intermedio para el ozono

Tabla AVII.1. Guía de calidad del aire de la OMS y objetivo intermedio para el ozono: concentraciones de 8 horas. Fuente: Organización Mundial de la Salud (2006).

	Media máxima diaria de ocho horas ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Fundamento del nivel elegido
Niveles altos	240	Efectos significativos en la salud; proporción sustancial de la población vulnerable afectada.
Objetivo intermedio-1 (OI-1)	160	Efectos importantes en la salud; no proporciona una protección adecuada de la salud pública. La exposición a este nivel está asociada con: <ul style="list-style-type: none"> <li>• efectos fisiológicos e inflamatorios en los pulmones de adultos jóvenes sanos que hacen ejercicio expuestos durante periodos de 6,6 horas;</li> <li>• efectos en la salud de los niños (basados en diversos estudios de campamentos de verano en los que los niños estuvieron expuestos a niveles ambientales de ozono);</li> <li>• aumento estimado de un 3-5% de la mortalidad diaria<sup>a</sup> (basado en los resultados de estudios de series cronológicas diarias).</li> </ul>
Guía de calidad del aire (GCA)	100	Proporciona una protección adecuada de la salud pública, aunque pueden producirse algunos efectos en la salud por debajo de este nivel. La exposición a este nivel de ozono está asociada con: <ul style="list-style-type: none"> <li>• un aumento estimado de un 1-2% de la mortalidad diaria<sup>a</sup> (basado en los resultados de estudios de series cronológicas diarias);</li> <li>• la extrapolación a partir de estudios de laboratorio y de campo, basada en la probabilidad de que la exposición en la vida real tienda a ser repetitiva y en que se excluyen de los estudios de laboratorio las personas muy sensibles o con problemas clínicos, así como los niños;</li> <li>• la probabilidad de que el ozono ambiental sea un marcador para los oxidantes relacionados con él.</li> </ul>

## Anexo 7.8 Umbrales de ozono, implantación de medidas fijas y documentación del emplazamiento de las estaciones

Los límites establecidos para el contaminante que se viene considerando, tanto a largo plazo como a corto plazo, aparecen en el Anexo I del BOE, 2011 (Ministerio de la presidencia, 2011).

Tabla AVIII.1 Umbrales a largo plazo. Fuente: Ministerio de la presidencia, 2011.

Objetivo	Parámetro	Valor	Fecha de cumplimiento
1. Valor objetivo para la protección de la salud humana.	Máxima diaria de las medias móviles octohorarias (1).	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no deberá superarse más de 25 días por cada año civil de promedio en un período de 3 años (2).	1 de enero de 2010 (3).
2. Valor objetivo para la protección de la vegetación.	AOT40, calculado a partir de valores horarios de mayo a julio.	18 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ de promedio en un período de 5 años (2).	1 de enero de 2010 (3).
3. Objetivo a largo plazo para la protección de la salud humana.	Máxima diaria de las medias móviles octohorarias en un año civil.	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .	No definida.
4. Objetivo a largo plazo para la protección de la vegetación.	AOT40, calculado a partir de valores horarios de mayo a julio.	6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ .	No definida.

(1) El máximo de las medias móviles octohorarias del día se deberá seleccionar examinando promedios móviles de ocho horas, calculados a partir de datos horarios y actualizados cada hora. Cada promedio octohorario así calculado se asignará al día en que dicho promedio termina, es decir, el primer período de cálculo para un día cualquiera será el período a partir de las 17:00 h del día anterior hasta la 1:00 h de dicho día; el último período de cálculo para un día cualquiera será el período a partir de las 16:00 h hasta las 24:00 h de dicho día.

(2) Si las medias de tres o cinco años no pueden determinarse a partir de una serie completa y consecutiva de datos anuales, los datos anuales mínimos necesarios para verificar el cumplimiento de los valores objetivo serán los siguientes:

- Para el valor objetivo relativo a la protección de la salud humana: datos válidos correspondientes a un año.

- Para el valor objetivo relativo a la protección de la vegetación: datos válidos correspondientes a tres años.

(3) El cumplimiento de los valores objetivo se verificará a partir de esta fecha. Es decir, los datos correspondientes al año 2010 serán los primeros que se utilizarán para verificar el cumplimiento en los tres o cinco años siguientes, según el caso.

Tabla AVIII.2 Umbrales a corto plazo. Fuente: Ministerio de la presidencia, 2011.

	Parámetro	Umbral
Umbral de información.	Promedio horario.	180 µg/m <sup>3</sup>
Umbral de alerta.	Promedio horario (1).	240 µg/m <sup>3</sup>

(1) A efectos de la aplicación del artículo 25, la superación del umbral se debe medir o prever durante tres horas consecutivas.

También se establecen en el BOE los Criterios para clasificar y ubicar los puntos de medición para la evaluación de las concentraciones de ozono, según el artículo 11, son de interés las mediciones fijas:

Tabla AVIII.3. Macroimplantación de medidas fijas para estaciones urbanas. Fuente: Ministerio de la presidencia, 2011.

Tipo de estación	Objetivos de la medición	Representatividad (1)	Criterios de macroimplantación
Urbana.	Protección de la salud humana: evaluar la exposición de la población urbana al ozono, es decir, en las zonas cuya densidad de población y concentración de ozono sean relativamente elevadas y representativas de la exposición de la población en general.	Algunos km <sup>2</sup> .	Lejos de la influencia de las emisiones locales debidas al tráfico, las gasolineras, etc.; Localizaciones ventiladas donde puedan medirse una mezcla adecuada de sustancias; Ubicaciones como zonas residenciales y comerciales urbanas, parques lejos de los árboles, grandes calles o plazas de tráfico escaso o nulo, espacios abiertos característicos de las instalaciones educativas, deportivas o recreativas.

Tabla AVIII.4. Macroimplantación de medidas fijas para estaciones suburbanas.  
Fuente: Ministerio de la presidencia, 2011.

Tipo de estación	Objetivos de la medición	Representatividad (1)	Criterios de macroimplantación
Suburbana.	Protección de la salud humana y la vegetación: evaluar la exposición de la población y la vegetación en las afueras de las aglomeraciones, donde se encuentren los mayores niveles de ozono a los que la población y la vegetación tengan más probabilidades de hallarse directa o indirectamente expuestas.	Algunas decenas de km <sup>2</sup> .	A cierta distancia de las zonas de emisiones máximas, a sotavento con respecto a las direcciones dominantes del viento, en condiciones favorables a la formación de ozono; lugares donde la población, los cultivos sensibles o los ecosistemas naturales ubicados en los márgenes de una aglomeración estén expuestos a niveles elevados de ozono; cuando así proceda, algunas estaciones suburbanas podrán situarse a barlovento de las zonas de emisiones máximas, con respecto a la dirección predominante del viento, para determinar los niveles regionales de fondo de ozono.

Para el estudio se tendrán en cuenta tipos dentro de estas dos estaciones, pero también existen las de tipo rural y rural de fondo. En el caso del ozono es importante que además de los niveles de ozono, también se midan las sustancias precursoras de ozono.

#### Microimplantación:

En la medida de lo posible, se seguirán las directrices, asegurando asimismo que la entrada del sistema de captación se sitúe alejada de fuentes de emisiones tales como chimeneas de hornos e instalaciones de incineración y a más de 10 m de la carretera más cercana, y tanto más alejada cuanto mayor sea la intensidad del tráfico (Ministerio de la presidencia, 2011).

#### Documentación y revisión de la elección del emplazamiento:

Se seguirán las directrices descritas en el apartado IV del anexo III, exigiéndose, además, la adecuada selección e interpretación de los datos de seguimiento en el contexto de los procesos meteorológicos y fotoquímicos que afecten a las concentraciones de ozono medidas en el emplazamiento de que se trate (Ministerio de la presidencia, 2011).