



## Trabajo Fin de Grado

Titulación: Ciencias Ambientales

Mención:

Título del trabajo: Análisis de las concentraciones verticales de ozono troposférico en Madrid en los años 2022 y 2023 mediante datos de ozono-sondeos.

English title: Analysis of vertical concentrations of tropospheric ozone in Madrid in the years 2022 and 2023 using ozonesondes.

Autor/es

María Rodríguez Gallego

Director/es

Miguel Escudero Tellechea

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR  
Año 2024

## **Resumen**

El ozono es un contaminante secundario, no se forma por sí solo, sino gracias a sus precursores, los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles, y con la ayuda de la radiación solar, se crea en la parte de la atmósfera más cercana a la superficie, la troposfera.

El ozono también se encuentra presente en la atmósfera en bajas concentraciones debido a eventos naturales. No obstante, gran parte del ozono presente en la troposfera proviene de las emisiones humanas de sus precursores.

Este contaminante tiene una estrecha relación con las variables meteorológicas, las altas temperaturas, la humedad, y la velocidad del viento.

Para entender el comportamiento del O<sub>3</sub> en la troposfera se deben estudiar sus perfiles verticales, así como su concentración en superficie, dado que altas concentraciones de este contaminante, son muy perjudiciales tanto para la salud del ser humano como para el medioambiente, así como los cultivos, que juegan un papel importante en la economía de muchas personas.

El cambio climático está haciendo que los episodios de contaminación sean cada vez más comunes. Por lo tanto, la principal causa de este incremento en las concentraciones es responsabilidad de las acciones humanas.

**Palabras clave:** ozono, ozono-sondeos, perfil vertical, radiación solar, análisis temporal.

## **Abstract**

Ozone is a secondary pollutant, it does not form by itself, but through its precursors, nitrogen oxides and volatile organic compounds, and with the help of solar radiation it is created in the part of the atmosphere closest to the surface, the troposphere.

Ozone is also present in the atmosphere in low concentrations due to natural events. However, a big part of the ozone in the troposphere comes from human emissions of its precursors.

This pollutant is closely related to meteorological variables, high temperatures, humidity, and wind speed.

To understand how O<sub>3</sub> behaves in the troposphere, its vertical profiles as well as its surface concentration must be studied, since high concentrations of this pollutant are very harmful to both human health and the environment, as well as to crops, which play an important role in the economy of many people.

Climate change is making pollution episodes more and more common. The main cause of this increase in concentrations is therefore the responsibility of human actions.

**Key words:** ozone, ozone-sondes, vertical profile, solar radiation, temporal analysis.

*El Trabajo de Fin de Estudios que presento para su exposición y defensa es original y todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.*

*Maria Rodríguez Gallego*

## Índice

1.	Introducción .....	6
1.1.	Conceptos generales.....	6
1.2.	Formación ozono troposférico.....	6
1.3.	Fuentes, sumideros y transporte de ozono.....	8
1.4.	Efectos del ozono troposférico.....	11
1.5.	Valores límite y umbrales.....	14
1.6.	Situación del ozono en Europa .....	16
1.7.	Importancia del ozono en altura .....	17
1.8.	Valoración del trabajo.....	18
2.	Objetivos .....	20
3.	Metodología y datos .....	21
3.1.	Ozono-sondeos .....	21
3.1.1.	Cálculos ozono-sondeos .....	23
3.2.	Datos en superficie .....	26
4.	Resultados e interpretación .....	29
4.1.	Contexto meteorológico .....	29
4.2.	Perfiles verticales en distintas épocas climáticas .....	30
4.2.1.	Perfiles de parámetros meteorológicos.....	31
4.2.2.	Capa de mezcla y factor de ventilación .....	33
4.2.3.	Ozono en la vertical.....	34
4.3.	Perfiles verticales por nivel de concentración en superficie.....	36
4.3.1.	Perfiles de parámetros meteorológicos.....	38
4.3.2.	Capa de mezcla y factor de ventilación .....	39
4.3.3.	Ozono en la vertical.....	40
4.3.4.	Perfiles de episodios extremos de contaminación por ozono .....	41
5.	Conclusiones .....	46
6.	Bibliografía .....	48

## **1. Introducción**

Este Trabajo Fin de Estudios se centra en el análisis del ozono troposférico en la ciudad de Madrid durante los años 2022 y 2023 gracias a las mediciones realizadas en ozono-sondeos. Complementando a los ozono-sondeos que toman medidas en la vertical, se usan datos de estaciones en superficie. Las concentraciones de ozono que proporcionan los ozono-sondeos, así como las estaciones de calidad del aire (datos en superficie) se pueden relacionar con otras variables meteorológicas como la temperatura o la velocidad del viento para extraer conclusiones de la fenomenología de la contaminación que el ozono troposférico presenta en la capital de España.

### **1.1. Conceptos generales**

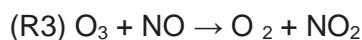
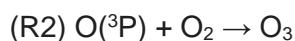
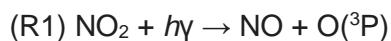
El O<sub>3</sub> troposférico es un contaminante secundario que se encuentra en la capa más cercana a la superficie de la tierra, llamada, la troposfera, que abarca hasta unos 10km de altura. El estudio se centra en el ozono presente en este nivel de la atmósfera que se debe diferenciar de la famosa capa de ozono. Formada también por este gas, se encuentra en la estratosfera, llegando hasta los 50km de altura, cuya función principal es proteger a la vida terrestre de la radiación ultravioleta. Absorbe esta radiación para evitar que llegue a la superficie de la tierra causando problemas a la salud como el cáncer y alteraciones en la vista, así como daños medioambientales. El origen de este O<sub>3</sub> es natural, gracias a la disociación radiativa de las moléculas de oxígeno que luego se vuelven a unir formando las moléculas de ozono por acción de la radiación solar. (Sergio Gil López, 2006) (Gil, S, 2006)

Sin embargo, a diferenciar del O<sub>3</sub> estratosférico, el que se forma en la troposfera, puede llegar a ser muy perjudicial para la vida terrestre. En ocasiones se habla de la existencia de un ozono bueno, y otro malo, para diferenciar a los dos.

### **1.2. Formación ozono troposférico**

El ozono troposférico se forma en esta capa de la atmósfera con ayuda de sus precursores, principalmente, los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles y el monóxido de carbono en presencia de luz solar.

La reacción química principal por la que se forma el ozono troposférico es la siguiente:



La formación del ozono, se produce generalmente cuando el dióxido de nitrógeno se disocia, generando un átomo de oxígeno, que se combina con el oxígeno molecular (R1).

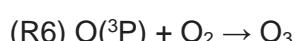
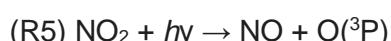
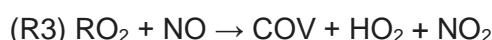
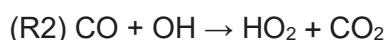
Estas tres reacciones resumen como se forma el ozono, en el llamado ciclo base de los óxidos de nitrógeno. En la reacción 1, el  $\text{NO}_2$ , junto con la radiación solar forma el NO y un átomo de oxígeno. Este átomo, se junta con la molécula de oxígeno presente en el aire y forma el ozono en la reacción 2. Por último, la tercera reacción, ejemplifica como el ozono en presencia de NO, se disocia formando una molécula de oxígeno y  $\text{NO}_2$ .

Por lo tanto, las reacciones 1 y 2 tienen que ver con la formación de ozono, y la 3 con la destrucción, llamada titración, dentro del ciclo base.

Debido a esto, los NOx también sirven como mitigadores del ozono (reacción 3). El NO que se emite, se combina rápidamente con el ozono en superficie y su concentración se ve reducida. Por estas reacciones, se concluye que el ozono está directamente relacionado con el  $\text{NO}_2$  e inversamente relacionado con el NO. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s. f.-a)

Por ello, el papel de los óxidos de nitrógeno es muy complejo ya que, si se reduce la producción de este contaminante, las concentraciones de ozono aumentan, por lo que las acciones de mitigación recaen principalmente en los compuestos orgánicos volátiles. Esto sucede en zonas muy contaminadas. (Agencia Europea de Medio Ambiente, s. f.)

En cuanto a la relación de los NOx con los COV, CO y el ozono, es la siguiente:



Las reacciones 5 y 6 son las del ciclo base, mientras que la 1 y 3 de los COV y las 2 y 4 del CO. En la reacción 1 los COV reaccionan con un radical OH, y en la 2 sucede lo mismo, pero con el CO. Esto genera un radical RO<sub>2</sub> en el caso de los COV, que reacciona con el NO para formar el NO<sub>2</sub>, mientras que el CO genera un radical HO<sub>2</sub> que también reacciona con el NO para formar NO<sub>2</sub>. A partir de este punto, las dos siguen con la reacción 5 para poder comenzar el ciclo base.

Por lo tanto, los compuestos orgánicos volátiles y el monóxido de carbono se oxidan y forman el ozono en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. A estas reacciones donde la radiación solar tiene un papel importante para la formación del contaminante, se les llama reacciones fotoquímicas.

Este ciclo de reacciones de los COV tiene mucha importancia en la formación de ozono ya que permite formar el NO<sub>2</sub>, con el carácter oxidante de los peróxidos. Si solo existiera el ciclo base no habría tanto O<sub>3</sub> en la troposfera, por ello el ciclo de los COV forma un papel importante en el desplazamiento del ciclo base, ganando mucha importancia en la formación del ozono. (D. S. Sillman, s. f.)

De esta manera, existe la formación de ozono, gracias al ciclo de los NO<sub>x</sub>, así como la formación del ozono gracias a la reacción de los NO<sub>x</sub> con COV y CO. (Chu et al., 2024)

La tasa de formación del ozono depende directamente de la relación de los NO<sub>x</sub> y COV. Se debe diferenciar entre las zonas de NO<sub>x</sub> limitado y las de COV limitado. Cuando se tiene un carácter de alto COV, mientras que el NO<sub>x</sub> es bajo, el ozono incrementará cuando también lo hagan los NO<sub>x</sub>, y por ello, si los COV incrementan, el ozono no aumenta. Se trata de una relación porcentual, al ser mucho menores las concentraciones de NO<sub>x</sub>, en el momento que aumenten un poco, también lo hará el ozono.

En el caso de que las concentraciones de COV sean bajas, y las de NO<sub>x</sub> altas, como en las ciudades, sucede lo contrario. El ozono incrementa a la vez que lo hacen los COV y disminuye en el momento que los NO<sub>x</sub> aumentan. (Chu et al, 2024)

Esto es lo que diferencia las zonas de sensibilidad de COV frente a las de NO<sub>x</sub>, depende de la relación en sus concentraciones. (S. Sillman & He, 2002)

### **1.3. Fuentes, sumideros y transporte de ozono**

La producción de ozono en la estratosfera es natural mientras que en la troposfera se produce con la ayuda de sus precursores que tienen en gran parte origen

antropogénico. Por ello, para hablar de fuentes de ozono, se debe hablar de las fuentes de sus precursores.

Las fuentes principales de NO<sub>x</sub> proceden de la emisión de combustibles, sobre todo de vehículos rodados, así como industrias que usan altas temperaturas e industrias especializadas en la generación de energía. Tanto el NO como el NO<sub>2</sub>, son contaminantes primarios en las zonas de emisión, sin embargo, el NO con el paso del tiempo se oxida y se convierte en NO<sub>2</sub>, contaminante secundario, por lo que hay mucho más NO en las zonas de emisión. Por ello, las zonas donde más contaminación por NOx hay es en los espacios urbanos, donde más desplazamientos con transporte se realizan. (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, s. f.-b)

Las fuentes naturales de NOx también deben tenerse en cuenta. Las principales son, las actividades volcánicas, la propia descomposición de los nitratos con ayuda de las bacterias, o las quemas, incluyendo las forestales y los rastrojos. (PRTR España, s. f.)

En cuanto a las fuentes principales de COV de origen antropogénico, el uso de disolventes es el mayor contribuidor. También se deben tener en cuenta, la quema de combustibles fósiles, las pinturas, los pegamentos... (Dirección General de Calidad Ambiental del Gobierno de Aragón, s. f.)

Los COV de origen natural tienen un papel muy importante ya que ocupan un alto porcentaje de los COV presentes en la atmósfera. Se emiten principalmente por la respiración de los bosques, a través de las masas de agua, tanto continentales como oceánicas, así como a través del suelo, por la descomposición. (Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul, s. f.)

Además de las fuentes de ozono dependientes de sus precursores, también existen las intrusiones de ozono desde la estratosfera, donde las altas concentraciones de este contaminante son de origen natural. Este transporte hasta la troposfera depende de los flujos de masa, así como de las concentraciones de ozono en la baja estratosfera. La circulación de Brewer-Dobson explica que, en los trópicos, el aire asciende hasta la estratosfera y vuelve a caer en altitudes más altas, incrementando las concentraciones de ozono en estas zonas de la tierra. (Olsen et al., 2004)

Alrededor del 88% de la población humana se ve afectada por estos precursores, por lo que va directamente ligado a la producción del contaminante secundario, el ozono troposférico. (Cooper et al., 2014)

Debido a que el ozono troposférico también tiene un origen natural, siempre va a haber cierta concentración de este gas en la atmósfera, no obstante, cuando la acción

humana afecta a la elevación en las concentraciones de este contaminante debido al uso de sus precursores, es cuando la problemática comienza.

Por lo tanto, las fuentes de ozono troposférico en la atmósfera vienen de intercambios de masas de aire entre troposfera y estratosfera, así como la producción fotoquímica in situ. En cuanto a la mitigación del ozono, se habla de la deposición seca y la destrucción fotoquímica in situ. (Saavedra Vázquez, 2010)

La deposición seca se trata de la eliminación de la atmósfera de los contaminantes para su traslado a la superficie terrestre gracias al transporte o a la sedimentación. El ozono es transportado hasta la superficie, donde crea una lámina y se absorbe a través de las plantas, el suelo o el agua. Por lo tanto, se trata de un proceso de interacción entre la atmósfera y la biosfera, ya que contiene las concentraciones de ozono que se encuentran en la atmósfera, así como la entrada del contaminante a la superficie terrestre.

Esta deposición seca depende de la cobertura vegetal que se encuentre en el terreno. En las zonas cubiertas por nieve, hielo o agua la deposición es mucho más lenta frente a las zonas con coberturas vegetales extendida. (Hardacre et al., 2015) (*Dry Deposition of Ozone Over Land: Processes, Measurement, and Modeling - Clifton - 2020 - Reviews of Geophysics - Wiley Online Library*, s. f.)

La destrucción fotoquímica in situ, más conocida como titración de los óxidos de nitrógeno, es la comentada en la (R3) del ciclo base. En zonas donde las concentraciones de NO son muy elevadas, es decir zonas próximas a su emisión, durante la noche se produce este fenómeno de destrucción del ozono. Debido a la falta de radiación solar, el NO emitido se combina con el ozono para destruirse, formando NO<sub>2</sub> y una molécula de oxígeno. (D. S. Sillman, s. f.)

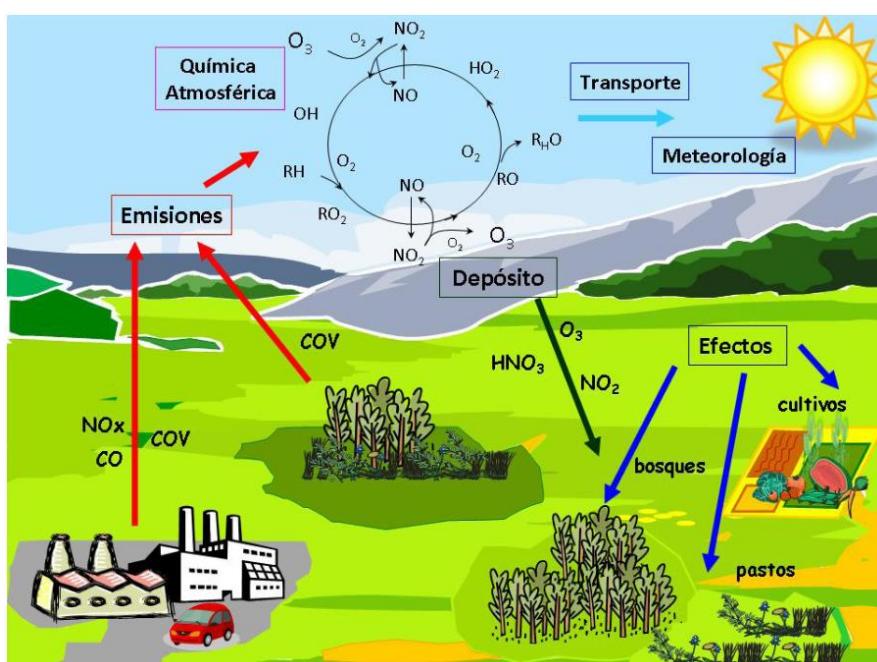


Ilustración 1: ciclo del ozono. (Centro de Investigaciones, Energéticas & Medioambientales y Tecnológicas, s. f.)

Todos estos factores favorecen que este contaminante se forme en zonas muy pobladas y se transporte y acumule en zonas rurales y suburbanas. En las zonas urbanas preocupan especialmente los contaminantes primarios que son emitidos directamente a la atmósfera, por ello, las concentraciones de estos bajan al salir de las áreas urbanas. Sin embargo, con el ozono troposférico pasa algo distinto, ya que al depender de sus precursores este es transportado fuera de las ciudades a zonas rurales, donde se acumula.

En resumen, el ozono, así como sus precursores pueden ser transportados largas distancias hasta llegar a zonas rurales, donde no se destruye debido a que el aire está más limpio, sin contaminación, y el ozono se puede acumular durante toda la noche. Al contrario, en las zonas urbanas donde actúan sus precursores primarios, estos ayudan a su formación, pero al mismo tiempo a su destrucción. Por esto, en muchas ocasiones se ven altas concentraciones de ozono, no tanto en las zonas de emisión (zonas urbanas), sino zonas a la que se ha transportado (zonas periurbanas y rurales).

Con el día y la noche pasa algo muy parecido, ya que, durante el día, con la radiación solar y las emisiones de precursores, las concentraciones van a ser muy altas. Sin embargo, durante la noche, el ozono sigue estando muy presente en la atmósfera. A pesar de la falta de actividad durante las horas nocturnas, así como de radiación solar, durante estas horas del día, se produce una acumulación del contaminante.

Los óxidos de nitrógeno juegan un papel importante en esta acumulación ya que ayudan a la formación del ozono, pero también a su destrucción, por lo que en estas zonas rurales donde hay menos emisión de óxidos de nitrógeno, el ozono no se destruye, sino que se queda libremente en la atmósfera.

Esto afecta no solo a la salud humana, sino que los cultivos característicos de estas zonas rurales, se ven también altamente perjudicados. (iMiDRA, 2022)

#### **1.4. Efectos del ozono troposférico**

Debido a la abundancia de ozono en gran parte del planeta, ya sean zonas de emisión o zonas donde ha conseguido ser transportado, cabe destacar los efectos que genera una exposición a este contaminante.

Los principales efectos que genera son, a la salud humana de manera directa, así como a los animales, a las especies vegetales y ayuda a la corrosión de los materiales.

Se debe destacar que el O<sub>3</sub> es un gas con carácter oxidativo, el cuál explica gran parte de los efectos que genera a los seres humanos. Provoca principalmente la inflamación de algunos órganos del sistema respiratorio que puede tener causas catastróficas. Los efectos sobre la salud humana más comunes son el asma, la inflamación que provoca dificultades respiratorias o bronquitis crónica entre otras. La población infantil corre especial peligro debido a que su relación dosis/masa corporal es mayor, por lo que lleva a muertes prematuras. Las infecciones pulmonares también son comunes debido a la inflamación de estos órganos. (Escudero et al., 2019)

Para ser más específicos, a corto plazo, se ha demostrado que la exposición a O<sub>3</sub>, incrementa los pacientes ingresados con enfermedad pulmonar obstructiva crónica, así como enfermedad pulmonar intersticial. Por todo esto, los grupos poblacionales más afectados son los niños, así como los ancianos. (Kim et al, 2020)

Las estadísticas de mortalidad por ozono son escalofriantes, convirtiéndolo en uno de los contaminantes más mortales. Un estudio del año 2017 indica que se pueden atribuir 1,23 millones de muertes en el año 2010, en adultos mayores de 30 años, con una exposición de 13,6 ppb a 84,6 ppb. (Malley, C. et al, 2017)

Este estudio se realizó cuantificando las concentraciones horarias en un periodo de 6 meses. En cuanto a la Unión Europea y la afección en la salud de los niños, según la Agencia Europea de Medio Ambiente, se produjeron en el año 2020, unas 28.000 muertes prematuras debido a concentraciones de ozono por encima de los 70 µg/m<sup>3</sup>. (European Environmental Agency, 2022)

La exposición al contaminante cada vez es mayor, con casi la totalidad de la población de Europa expuesta a niveles que superan los recomendados por la Organización Mundial de la Salud.

También se debe tener en cuenta, la afección que tiene sobre los cultivos, que al fin y al cabo también afecta económicamente a los humanos. El ozono consigue introducirse por las plantas a través de las estomas, generando daños a nivel celular, incluso llegando a afectar a la apertura y cierre de esta parte de la planta que se encarga del intercambio de gases y agua entre la atmósfera y la propia planta. También afecta a la capacidad fotosintética de la planta, generando una alteración de la proporción de clorofila. Los efectos más visuales son, la reducción del crecimiento, así como la productividad, lo cual es muy nocivo para los cultivos. (Aranzazu,G. et al, 2012)

Para poner en contexto, los efectos sobre la vegetación, en 2021, el 18% de las tierras agrícolas estuvieron expuestas a valores superiores a los que regula la Directiva sobre la calidad del aire ambiente. Este porcentaje corresponde a unas 401.000 km<sup>2</sup> de superficie agrícola que se vieron expuestas a concentraciones superiores al valor objetivo. (European Environmental Agency, 2023)

En cuanto al deterioro de los materiales, destacan los daños sobre los elastómeros. Este contaminante consigue destruir la cadena del doble enlace de los elastómeros, haciendo que estos materiales característicos por su flexibilidad, pierdan esta particularidad. Por otra parte, es capaz de estropear tintes, pinturas y fibras, cambiando el color de estas. (Sala Rey. F y Squadrito. G, 1992)

Por último, cabe destacar el daño sobre el medio ambiente. El ozono es un gas de efecto invernadero, junto con otros contaminantes como el dióxido de carbono, o el metano. Estos se encuentran de forma natural en la tierra, sin embargo, el problema empieza cuando sus concentraciones se elevan debido a las emisiones antropogénicas. (Parlamento Europeo, 2023)

El ozono es uno de los contaminantes que forman el smog fotoquímico que está tan presente en las grandes ciudades. Smog viene de la combinación de las palabras en inglés smoke y fog que significan humo y niebla. Se trata de una nube contaminante formada principalmente por ozono, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles. Se le llama fotoquímico ya que estos reaccionan con la luz ultravioleta del sol.

Al igual que los episodios de contaminación por ozono troposférico, el smog predomina en épocas de calor y con una insolación predominante. Estos episodios de contaminación afectan a la salud humana y al medio ambiente de una manera muy parecida a los episodios de ozono troposférico. (Sher. E, 1998)

Por último, cabe destacar el forzamiento radiativo del ozono. El Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) lo define como las alteraciones que sufre la radiación solar que entra en la tierra debido a perturbaciones en el sistema climático del planeta. Como puede ser, el incremento de las concentraciones de contaminantes o los cambios en la irradiación solar que llega a la superficie terrestre. (Myhre et al., 2013)

Como se puede observar en la ilustración 2, el ozono tiene un efecto radiativo indirecto debido a las reacciones químicas que tiene con otros gases de efecto invernadero. Se estima que el O<sub>3</sub> troposférico calienta cuando reacciona con el CH<sub>4</sub>, con los NO<sub>x</sub>, así como los COV y CO. Sin embargo, tiene un carácter de enfriamiento en la estratosfera, donde reacciona con los halocarburos destruyéndose ambos, así como la capa de ozono.

### (a) Effective radiative forcing

1750 to 2019

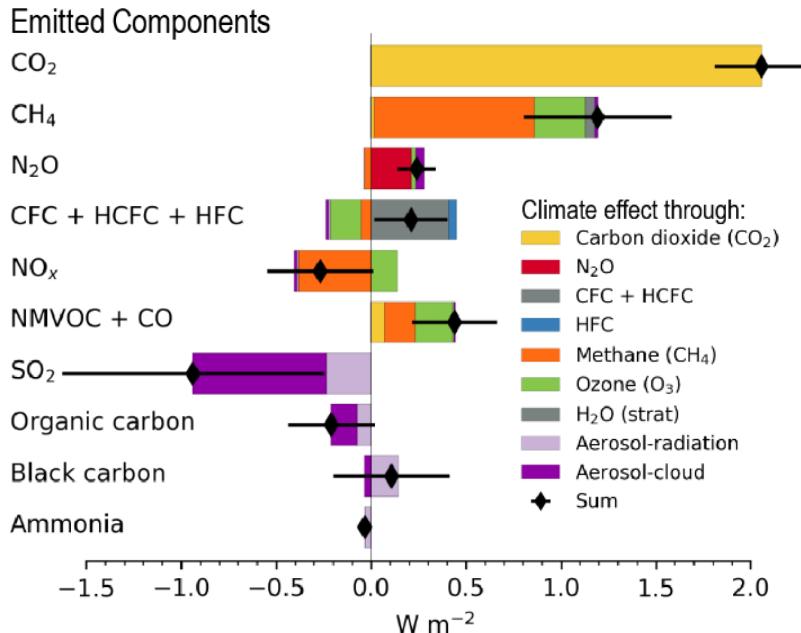


Ilustración 2: forzamiento radiativo de diferentes gases (1750-2019).

(The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022)

### **1.5. Valores límite y umbrales**

Debido a los efectos que puede provocar la exposición al O<sub>3</sub>, así como la cantidad de población que se ve expuesta a niveles elevados de este contaminante, sus valores objetivos y umbrales se encuentran legislados.

Los valores límite los dicta la el Real Decreto 102/2011, en el Anexo I.

- Valor objetivo para la protección de la salud humana (medidas octohorarias del día en un año civil): 120 µg/m<sup>3</sup>, sin superarse 25 días por año civil, en un promedio de 3 años.
- Valor objetivo para la protección de la vegetación (AOT40, calculada a partir de valores horarios de mayo a julio): 18.000 µg/m<sup>3</sup> × h con un promedio de 5 años.
- Objetivo a largo plazo para la protección de la salud humana (máxima diaria de las medias móviles octohorarias en un año civil): 120 µg/m<sup>3</sup>.
- Objetivo a largo plazo para la protección de la vegetación (AOT40, calculada a partir de valores horarios de mayo a julio): 6.000 µg/m<sup>3</sup> × h

El valor objetivo es el nivel del contaminante que en un momento determinado se deberá alcanzar para prevenir o reducir los efectos tanto en la salud humana como en el medioambiente y la naturaleza. En cuanto al objetivo a largo plazo, se define como el nivel que se tiene que alcanzar a largo plazo usando una serie de medidas para proteger la salud humana, el medioambiente y la naturaleza.

Dentro del valor objetivo de protección para la vegetación, se introduce el concepto de AOT40 que se traduce directamente como “Accumulated Ozone Exposure over a threshold of 40 Parts Per Billion”. Se trata de la exposición a una acumulación de ozono superando el límite de 40 ppb, y por lo tanto 80 µg/m<sup>3</sup>. Se trata de la suma de la diferencia entre las concentraciones horarias superiores a los 80 µg/m<sup>3</sup> y 80 µg/m<sup>3</sup>, utilizando únicamente los valores horarios medidos entre las 8:00 y las 20:00, hora central europea.

En cuanto a los tipos de umbrales, se diferencian dos clases dependiendo de su peligrosidad para la salud humana:

- Umbral de información (promedio horario): 180 µg/m<sup>3</sup>
- Umbral de alerta (promedio horario): 240 µg/m<sup>3</sup>

El umbral de información se define la concentración que no puede superarse debido a que una exposición con una duración breve supone un riesgo para la salud de las personas vulnerables y, por lo tanto, se deben imponer acciones de manera inmediata por parte de la administración competente. Por otra parte, el umbral de alerta tiene una definición muy parecida, salvo en que el nivel superado supone un riesgo para la población en general, no solo la vulnerable, y también se deben imponer medidas de manera inminente.

En el caso de que se superen el umbral de alerta o de información, se deben difundir públicamente como mínimo:

- Toda la información disponible sobre la superación de los límites: ubicación, umbral superado, horario de la superación, concentración horaria máxima, así como la media octohoraria.
- Previsiones para los próximos días como las zonas a las que se puede desplazar o cambios que se pueden producir.
- Población que puede verse afectada y los efectos que pueden surgir.
- Medidas preventivas como indicación de las principales fuentes de emisión.

(Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, 2011)

### **1.6. Situación del ozono en Europa**

Gran parte de la población europea se ve afectada por altos niveles de O<sub>3</sub> en el aire, aunque la zona del mediterráneo sufre las mayores consecuencias. Este estudio toma especial importancia en España, ya que se trata de una zona con un clima mediterráneo en gran parte de la península. El ozono troposférico incrementa su producción en áreas con mucha actividad fotoquímica, lo cual caracteriza al mediterráneo continental.

Esto se observa muy bien en la siguiente figura (Ilustración 3), donde los niveles de ozono son bastante mayores en toda la zona del mediterráneo, en comparación con otras partes de Europa.

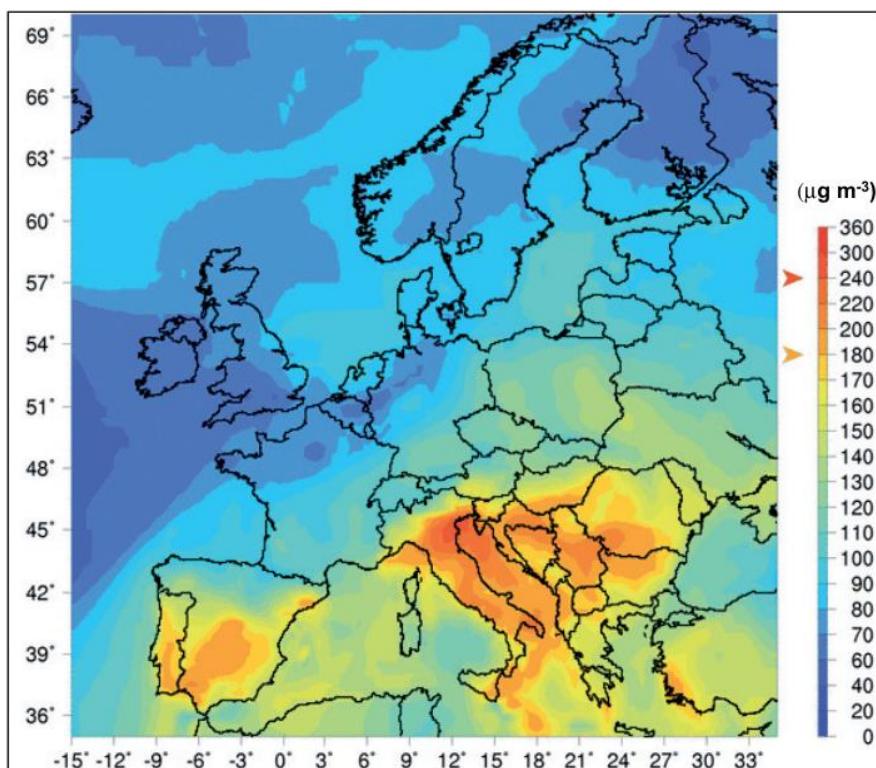


Ilustración 3: mapa de contaminación por ozono en Europa en junio de 2008.  
(Centro de Investigaciones, Energéticas & Medioambientales y Tecnológicas, s. f)

El clima mediterráneo se caracteriza por los veranos calurosos y secos. Este es un factor que hay que tener en cuenta para la formación del ozono troposférico en esta zona de Europa occidental.

La segunda variable a tener en cuenta en la costa mediterránea es la orografía, que se caracteriza por cordilleras cercanas a la costa que crean brisas marinas que

hacen recircular las masas de aire que favorecen el envejecimiento de las mismas y el aumento de las concentraciones de O<sub>3</sub>.

Los veranos cálidos y secos, con pocas lluvias, son muy favorables para la creación de este contaminante, por ello, se observa una estacionalidad muy marcada diferenciando los meses más calurosos y más fríos. La disminución del viento en estos meses de calor, también ayuda al ozono a quedarse “estancado” en la zona de producción del mismo, por lo que el transporte del contaminante a otras zonas es menor.

Por lo tanto, los episodios de contaminación aguda, son mayores en España, fundamentalmente por el clima, determinados patrones meteorológicos que se repiten con frecuencia, así como su particular orografía, característica por las montañas paralelas al mar y las mesetas en el centro peninsular. (Paoletti, 2006)

### 1.7. Importancia del ozono en altura

Los perfiles verticales de O<sub>3</sub>, son muy importantes tanto para conocer como se comporta este contaminante en altura, así como en la superficie.

Estos perfiles permiten identificar como se dispersa el O<sub>3</sub>, teniendo en cuenta la radiación solar que afecta a las concentraciones en superficie, así como los vientos que afectan a la dispersión y distribución, junto con el factor de ventilación de la capa de mezcla. Por lo tanto, para comprender los procesos que sufre el ozono en la atmósfera, no solo se puede hablar de su formación y destrucción química, sino que también se debe hablar de su dinámica de transporte.

Dentro de esta dinámica de transporte, se debe entender el papel que juega la capa de mezcla en el transporte del O<sub>3</sub>. (Escudero et al., 2019)

La troposfera significa literalmente “zona de mezcla”, por eso se puede encontrar la llamada capa de mezcla, que se caracteriza por la estabilidad atmosférica que presenta. Se trata de una franja en altura con fuertes vientos convectivos, donde hay una combinación constante de los contaminantes, como si se tratara de una olla a presión. (Ministerio de Medio Ambiente, s. f.)

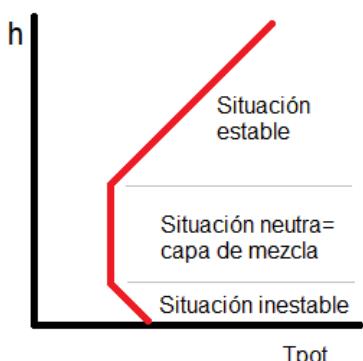


Ilustración 4: representación capa de mezcla con la temperatura potencial.

La situación orográfica de Madrid, con la sierra de Guadarrama, así como su meteorología, producen vientos cuya recirculación favorece la caída del O<sub>3</sub> hacia las zonas más bajas de la troposfera. Los perfiles verticales también son importantes para comprender los episodios de contaminación, pudiendo observar días con concentraciones anormalmente altas. Suele tratarse de días con vientos más suaves, cuya capa de mezcla llega a alturas mucho más bajas y con un factor de ventilación más suave de lo normal, favoreciendo la acumulación del contaminante y por lo tanto la generación de episodios. Por otro lado, existen los días totalmente contrarios, con grandes episodios de ventilación que favorecen el transporte en vertical, con una capa de mezcla mucho más alta. (Querol et al., 2018)

Todos estos factores pueden ser observados gracias a los ozono-sondeos, que no sólo son importantes debido a la verticalidad de las concentraciones, sino también por la posibilidad de obtener otras variables como la humedad o la velocidad del viento que pueden ser determinantes para explicar ciertos comportamientos del O<sub>3</sub>.

Por todo esto, la medición del O<sub>3</sub> a partir de los ozono-sondeos tiene gran importancia, ya que permiten comprender el comportamiento en altura del contaminante. También permite conocer la capa de mezcla, que es tan determinante en los días de episodios de contaminación, así como su factor de ventilación, su dispersión y transporte y por lo tanto sus tendencias, pudiendo llegar a prever futuros comportamientos del contaminante.

### **1.8. Valoración del trabajo**

Los ozono-sondeos han sido empleados tradicionalmente para evaluar los niveles de ozono e la estratosfera, sin embargo, este Trabajo Fin de Estudios se centra en la variabilidad vertical de las concentraciones de ozono, centrándose en el análisis de los datos en la troposfera. Para complementar a los ozono-sondeos, se estudia también el ozono en superficie de las que se disponen datos horarios, frente a los ozono-sondeos que se tratan de un único dato semanal. Esta decisión se debe a que se conoce la importancia que tienen las capas de acumulación de ozono en la troposfera, ya que estas capas caen a niveles más bajos que afectan a la superficie.

La importancia de este Trabajo Fin de Estudios recae en la problemática de contaminación que se sigue teniendo hoy en día con este contaminante, destacando la influencia que ejerce en la cuenca mediterránea.

Se trata de un gas de efecto invernadero por lo que también contribuye al calentamiento del planeta y a la formación del smog fotoquímico. Por lo tanto, no solo afecta al ser humano en términos de salud, sino también al medio ambiente y a los demás seres vivos, así como a factores económicos o ecológicos como la afección a los cultivos o el deterioro de los materiales.

Se trata de un problema de contaminación de origen antropogénico por lo que la mitigación o la reducción de este queda en manos del ser humano.

## **2. Objetivos**

Por todo lo comentado anteriormente en la introducción, el presente Trabajo Fin de Estudios, tiene varios objetivos, que se pueden dividir en principales y secundarios.

Objetivo principal:

- Estudiar la variabilidad del ozono troposférico en la ciudad de Madrid durante los años 2022 y 2023.

Objetivos secundarios:

- Realizar una compilación de perfiles verticales de O<sub>3</sub> en los primeros 5000 m de la atmósfera sobre la zona de estudio mediante datos de ozono-sondeos realizados en Madrid en los años 2022-2023.
- Analizar la variabilidad estacional de los niveles verticales de O<sub>3</sub> a distintos niveles de altitud.
- Analizar la tipología de perfiles de O<sub>3</sub> en función de las concentraciones en superficie en la cuenca aérea de Madrid.

### **3. Metodología y datos**

Este Trabajo Fin de Estudios se trata de un trabajo de análisis realizado a partir de los datos proporcionados por ozono-sondeos realizados en Madrid durante los años 2022 y 2023, así como las mediciones en superficie proporcionadas por las estaciones de calidad del aire pertenecientes al Ayuntamiento de Madrid. A continuación, se describirán los datos empleados, así como los cálculos realizados de los mismos.

#### **3.1. Ozono-sondeos**

Los ozono-sondeos se utilizan para medir el ozono verticalmente tanto en la troposfera como en la estratosfera, llegando hasta unos 30 km de altura. Registran la distribución vertical del contaminante gracias a la utilización de un globo que le hace ascender en altura. Este globo asciende junto con un medidor de ozono, así como una radiosonda meteorológica cuyos datos llegan una estación en la superficie. Cada vez que se realiza una nueva medición, el instrumento es revisado y preparado de nuevo. (Smit, H et al, 2007)

La técnica utilizada para la determinación de los perfiles verticales es la celda de concentración electroquímica (ECC). Por ello, el instrumento de medición se llama ECC 6A, siendo este último el modelo específico. Se trata de una celda electroquímica que dentro contiene dos celdas una con cámara catódica y la otra anódica, estas van unidas a una bomba de teflón. Ambas celdas tienen electrodos en forma de una malla de platino y que a su vez están sumergidas en una solución acuosa de yoduro de potasio (KI) a concentraciones distintas. Ambas celdas (catódica y anódica) se encuentran unidas por un puente iónico cuyo propósito es que los electrolitos del cátodo y ánodo no se lleven a mezclar.(Smit, H et al, 2007)

En cuanto al modo de medición del ozono, se toma una muestra de aire que entra a la celda catódica generándose una corriente eléctrica gracias al burbujeo de la celda, esta al reaccionar con el KI, forma una molécula de yodo. Esta molécula se vuelve a convertir en yoduro y al mismo tiempo, dos electrones fluyen por el circuito externo de la celda, por lo que la velocidad a la que entra al sensor el ozono es proporcional a la que sale. (Johnson et al., 2002)

La cápsula electroquímica va unida a un globo que es la que permite que el instrumento ascienda hasta pasados los 30000 m de altura. A partir de esta altura el globo tiene programado un nivel de explosión, a partir del cual empieza a caer con la

ayuda de un paracaídas para que el aterrizaje del aparato sea más suave. (Centro De Investigación Atmosférica de IZAÑA, s. f.)

En relación con la frecuencia de medición, se han analizado dos años, una vez por semana, de manera habitual suele ser los miércoles el día de lanzamiento, en torno a las 13 h local. Esto significa que significa que en el año 2022 se utilizaron 51 sondeos y en el año 2023, 49 sondeos, lo que hacen un total de 100 ozono-sondeos diferentes.

El ozono-sondeo de Madrid se estableció en 1988, en la zona universitaria de la Universidad Complutense, muy cerca de la Facultad Politécnica. La ejecución de los ozono-sondeos la realiza AEMET, ya que pertenece al Programa de Vigilancia Atmosférica Global, en el que participan más de 100 países, y que fue coordinada por el Ministerio de Medio Ambiente y Cambio Climático de Canadá.

A continuación, en la ilustración 5, se muestra la ubicación de la estación desde la cual se lanzan los ozono-sondeos semanalmente.

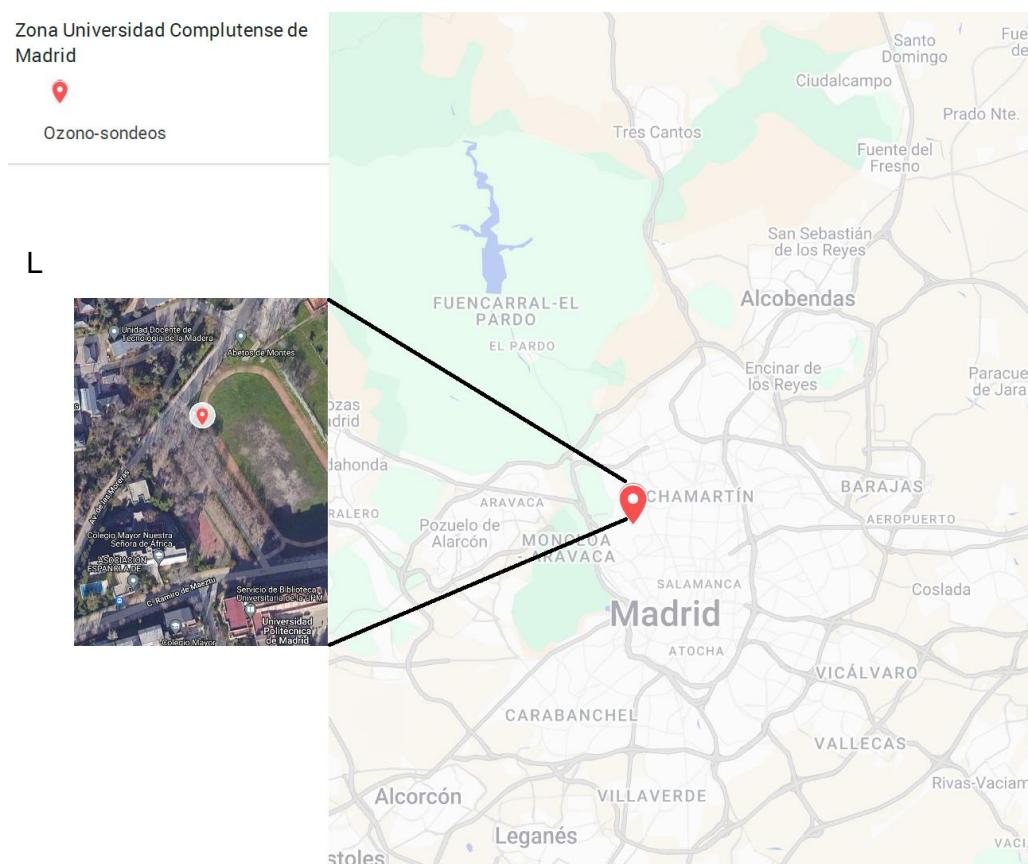


Ilustración 5: Zona de los ozono-sondeos.

Los datos de los ozono-sondeos han sido obtenidos de la web del Centro de Datos Mundiales de Ozono y Radiación Ultravioleta, en inglés, World Ozone and Ultraviolet Radiation Data Centre (WOUDC). Se trata de un espacio web perteneciente al

Gobierno de Canadá, donde se encuentra diferente información en relación con el ozono y la radiación ultravioleta. Es de libre acceso, y la recolección de los datos están abiertos al público.



Ilustración 6: instrumentación ozono-sondeos. (World Meteorological Organization, s. f.)

### 3.1.1. Cálculos ozono-sondeos

En los archivos obtenido en la WOUDC, se da toda la información necesaria para realizar los cálculos. Entre ellos, datos básicos de la medición, como el día, la hora o la altura. Este último dato siempre va a ser el mismo ya que se refiere a la altura de partida del sondeo, en concreto 631 m, que son los metros sobre el nivel del mar a los que se encuentra Madrid.

A continuación, se enumeran los datos más importantes, que son los siguientes: la presión total del aire (hPa), la presión parcial del ozono (mPa), la temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), la velocidad del viento (m/s), la dirección del viento (grados), la duración de la medición (s), la altura del globo (m), la humedad relativa (%) y por último la temperatura interior ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Con estas variables se van a realizar todos los cálculos.

Como la presión parcial de ozono y la presión del aire se encontraban en distintas unidades, tuvieron que convertirse a la misma, a pascales.

Seguidamente, se calcula el Mixing Ratio <sup>(1)</sup> para poder hallar los ppb de ozono.

Se hace la división de la presión del ozono frente a la del aire para sacar el Mixing Ratio, y se multiplica por  $10^9$  para tener los ppb <sup>(2)</sup> de ozono.

Teniendo los ppb se pueden calcular los  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>(3)</sup> de ozono. Se multiplican los ppb por la masa molar del ozono y se divide entre 24,5 que es el volumen de 1 mol de aire en condiciones normales.

$$(1) \text{ Mixing ratio} = P \text{ O}_3 / P_{\text{Pt aire}}$$

$$(2) \text{ ppb} = \text{Mixing ratio} * 10^9$$

$$(3) \mu\text{g}/\text{m}^3 = \text{ppb} * \text{Mmolar} / 24,45$$

La equivalencia de ppb frente a  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  es de  $1\text{ppb}=1,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a condiciones normales.

Los cálculos se hicieron sobre los primeros 5000m de mediciones ya que lo que se quiere representar es la troposfera, más cercana a la superficie terrestre. La decisión de realizar los cálculos sobre estos 5000 m más cercanos a la superficie, se debe a la susceptibilidad del  $\text{O}_3$  presente en esta capa de caer a la superficie.

La capa de mezcla de todos los días también fue hallada. La determinación de la capa de mezcla es esencial para el entendimiento de la dispersión de los contaminantes a estas alturas. Esta capa se forma en la troposfera y puede llegar hasta unos 3000 metros de altura, con fuertes vientos convectivos, caracterizado por una continua mezcla de los contaminantes que son transportados verticalmente. Para conseguir la altura de esta capa, así como la velocidad del viento entre otras variables se realizaron distintos cálculos.

Para conseguir calcular la altura a la que llega la capa de mezcla, se debe hacer el cálculo de la Temperatura potencial ( $\theta$ ) en altura, con el método de parcela, desarrollado por Holzworth en 1964. La temperatura potencial se define como la que se alcanza de manera adiabática seca hasta un nivel de referencia (1000 hPa). (Kowalski, A, s. f.)

La fórmula para el cálculo, es la siguiente:

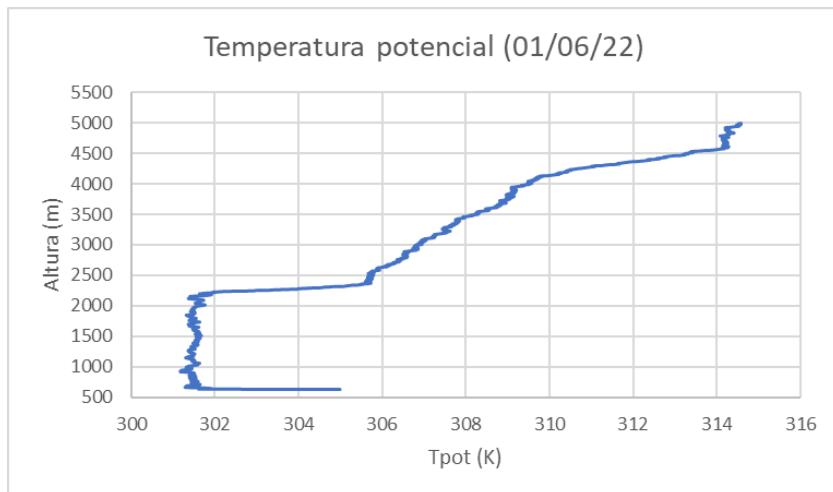
$$- \quad \theta = T (1000 / p)^{Rd / cp}$$

$$- \quad Rd/cp = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} / 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} = 0,286$$

$Rd/cp$  forma parte de la ecuación de Poisson siendo una constante con cifra 0,286. Ambas son constantes del aire seco, siendo  $Cp$  el calor específico y  $R$  la constante universal de los gases. (Kowalski, A, s. f.)

Según este método de la parcela, esta nunca se mezcla con el aire circundante, la parcela no transforma la atmósfera que la rodea, la presión dentro de la parcela es igual a la del aire ambiente, los desplazamientos de la parcela son adiabáticos por lo que la

temperatura potencial de esta permanece constante, y por último la atmósfera está en equilibrio hidrostático. (Jiménez, J.F, 2016).



Gráfica 1: Temperatura potencial (01/06/2022)

Para conseguir identificar la altura a la que llega la capa de mezcla, hay que fijarse en la neutralidad de la temperatura potencial. La zona de neutralidad se encuentra donde se forma una vertical en la gráfica, por lo que la altura de la capa de mezcla llega hasta el final de esta línea vertical. Por ejemplo, como se observa en la gráfica 1, la capa de mezcla llega hasta unos 2500m.

La dirección del viento se trata de otra variable calculada. Se trata de un vector con ángulo en dirección norte, con dos componentes, la x y la y.

- $x = v * \sin \theta$
- $y = v * \cos \theta$

Estas fórmulas, contienen un módulo ( $v$ ) que es la velocidad del viento mientras que  $\theta$  es el ángulo que forma con el eje, con la dirección norte.

A continuación, se puede calcular el llamado factor de ventilación ( $m^2/s$ ) que se trata del producto entre la altura de la capa (m) y la velocidad promedio dentro de la capa (m/s). Representa la superficie a disposición de las partículas para la dispersión en cada segundo. El grado de dispersión de las partículas depende de ambos factores (altura y velocidad). Puede haber una capa alta y poco viento. En este caso habrá mucha dispersión vertical pero poca dispersión horizontal.

Por último, se detecta que hay días con unas concentraciones de ozono muy poco habituales, por encima de la media, por lo que estos, se comparan con los episodios de contaminación en superficie cuyos informes posee el ayuntamiento de Madrid.

### **3.2. Datos en superficie**

Las mediciones en superficie son proporcionadas por las estaciones de calidad que forman parte de la red fija de vigilancia de calidad del aire del ayuntamiento de Madrid. Se trata de una red de 24 estaciones fijas y una móvil que miden: NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, CO, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub>, O<sub>3</sub> y BTX.

13 de esas estaciones miden el ozono troposférico en superficie, distribuyéndose por toda la ciudad de Madrid, tal y como se puede observar en la ilustración 7. De estas, 12 funcionaban en el 2022, sin embargo, en el 2023 se añadió una más, formando las 13 estaciones que miden actualmente el ozono troposférico en la ciudad de Madrid.

Por otra parte, la Comunidad de Madrid también dispone de dispositivos de medición de ozono distribuidos por toda la Comunidad Autónoma. La gestión de estas, recaen sobre la administración autónoma, a diferencia de las 13 estaciones comentadas anteriormente que forman parte de la red del Ayuntamiento de Madrid. Tanto las estaciones del ayuntamiento como las de la comunidad son distintas, tanto en número como en ubicación.

Para la realización de este trabajo se utilizan las mediciones proporcionadas por el Ayuntamiento de Madrid.

Para el cálculo de las concentraciones de ozono en superficie, se utiliza la conocida fotometría ultravioleta. La fotometría ultravioleta es el método de referencia según la norma EN 14625: 2005 y que se nombra dentro de la Directiva 2008/50/CE (Parlamento Europeo, 2008).

Esta se utiliza para conocer la concentración exacta del ozono, por lo que se necesita una muestra de aire. Esta muestra entra al medidor y se ilumina con una longitud de onda específica de 253,7 nm. Si existe ozono en la muestra, las moléculas absorben parte de la radiación, saliendo de la muestra una radiación distinta a la original ya que parte ha sido absorbida. Esta radiación restante es medida, y dependiendo de lo que ha sido absorbido por la muestra, se conoce la concentración presente en el aire. (Instituto de Salud Carlos III, s. f.)

## Estaciones de calidad del aire en Madrid (Ozono)

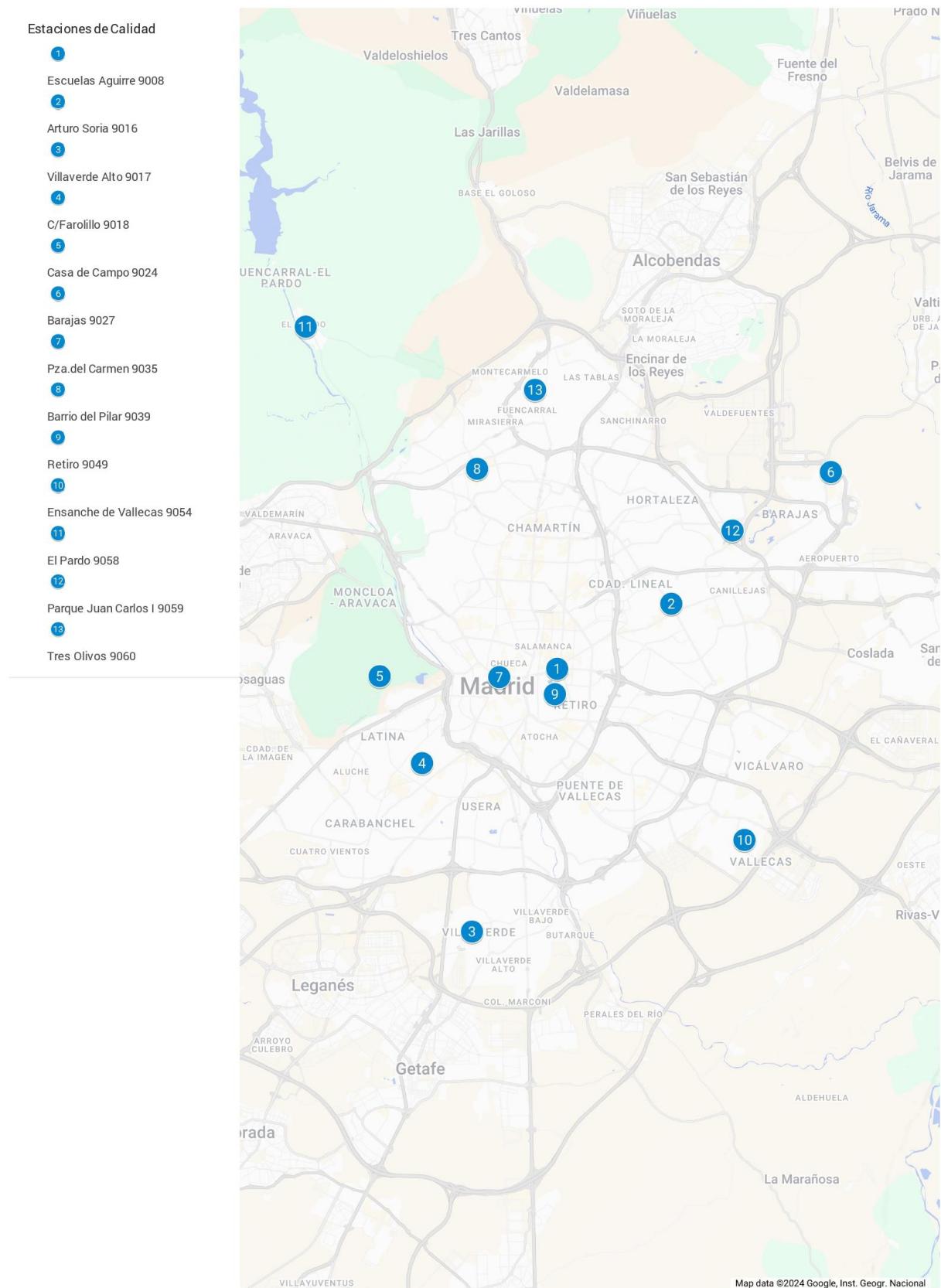


Ilustración 7: estaciones de calidad de ozono en Madrid.

En cuanto a la instrumentación usada para la medición de ozono en superficie, se diferencian tres tipos de estaciones de acuerdo a su ubicación y a la afección de fuentes contaminantes: urbana de fondo, urbana de tráfico y suburbana.

Las urbanas de fondo se colocan en zonas con niveles que puedan ser representativas para la población general, las de tráfico se colocan en lugares que puedan ser representados por una carretera o calle cercana, evitando siempre que haya microambientes en zonas cercanas, y por último las suburbanas se encuentran fuera de la ciudad, donde más ozono hay disponible. (Ayuntamiento de Madrid, s. f.-a)

Además de los monitores de calidad del aire, las estaciones están equipadas con: una torre meteorológica que contiene sensores para medir; dirección y velocidad del viento, temperatura, presión barométrica, humedad, radiación solar y pluviómetro. (Ayuntamiento de Madrid, s. f.-c)



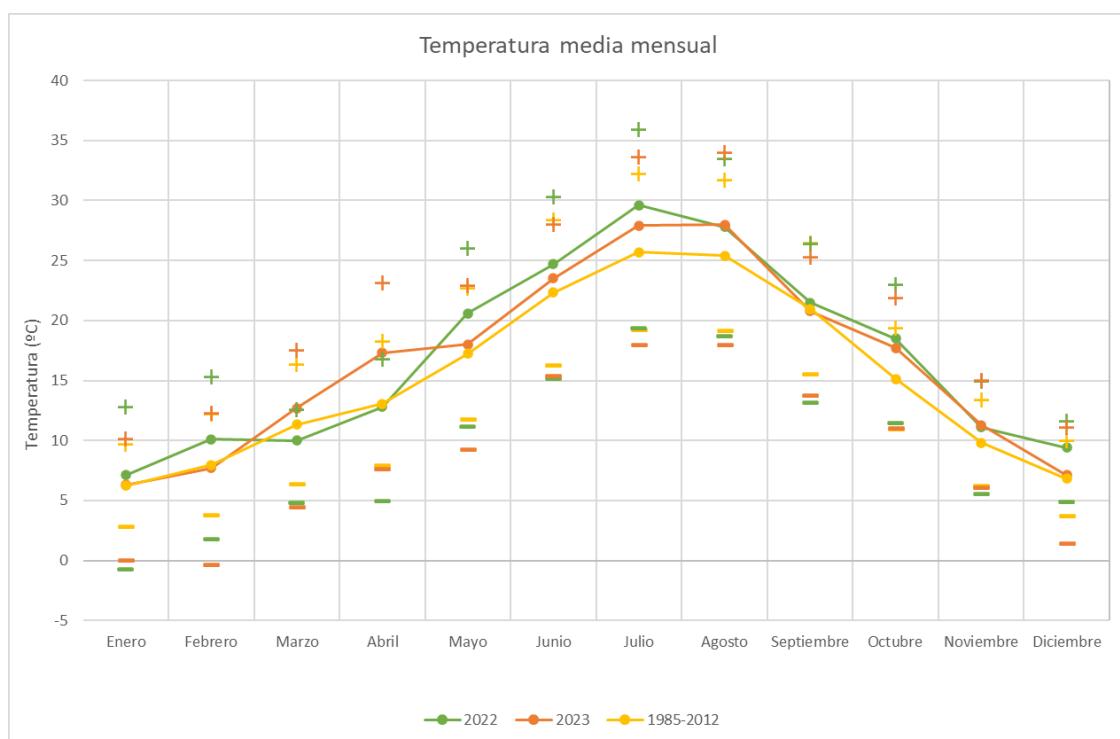
Ilustración 8: Estación de vigilancia de calidad del aire Casa de Campo. (Ayuntamiento de Madrid, s. f.)

## **4. Resultados e interpretación**

### **4.1. Contexto meteorológico**

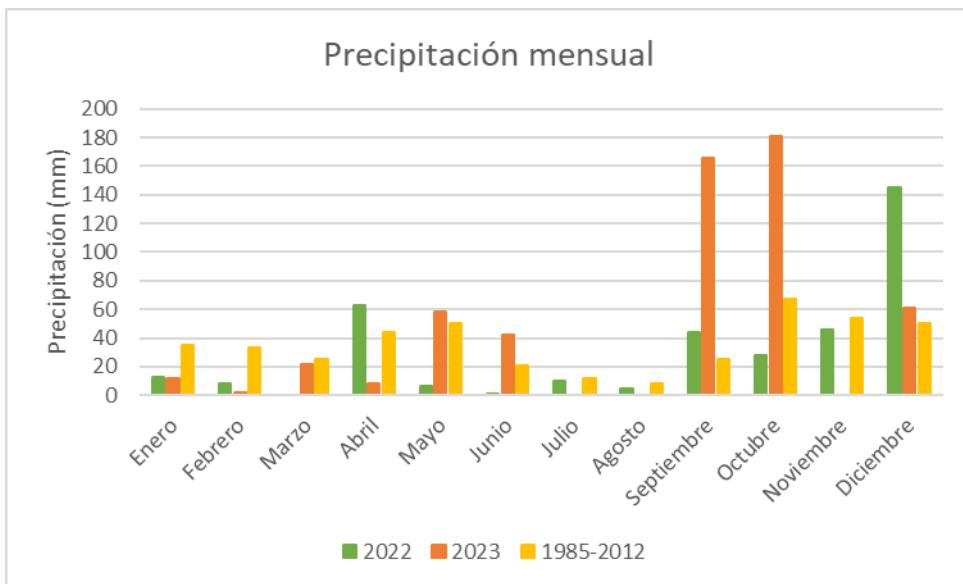
Para el cálculo de los siguientes parámetros, se usan los datos proporcionados por AEMET que dispone de informes mensuales, tanto del año 2022 como del 2023. Por otra parte, también se han utilizado las medias mensuales de una serie de datos desde el 1985 hasta el 2012, para ser usado como referencia. Se han utilizado las medias mensuales tanto de temperatura como de precipitación total de la estación del Retiro (con altitud 40°24' N, longitud 3°40' W y altitud 667m), situada en el centro de Madrid.

(Agencia Estatal de Meteorología, s. f.) (Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid, s. f.)



Gráfica 2: Temperatura media mensual en superficie en la estación de El Retiro en 1985-2012, 2022 y 2023. Los símbolos + y - significan respectivamente, las temperaturas medias de las máximas y de las mínimas

Como se observa en la gráfica 2, tanto el año 2022 como el 2023 superaron a la media de la serie de datos de 1985-2012, destacando los meses de calor del 2022 sobre los del 2023. Las medias de las máximas de los años 2022 y 2023 también superan los valores medios de los máximos del periodo de referencia. Las mínimas de ambos años también son valores inferiores a los del periodo 1985-2012. Por lo tanto, las temperaturas son más extremas estos dos años ya que hay una mayor distancia entre sus máximos y mínimos.



Gráfica 3: Precipitación total mensual (mm) en 2022 y 2023 y promedio de la precipitación mensual total en el periodo 1985-2012 en la estación de El Retiro.

En cuanto a la precipitación de ambos años (gráfica 3), destaca significativamente las precipitaciones de septiembre y octubre del 2023, así como las de diciembre de 2022. Durante los meses de verano, el año 2023 fue especialmente seco, exceptuando el mes de junio.

Como resumen, los promedios de temperatura de 1985-2012, son más bajos que los registrados en los dos años que se estudian, siendo cada vez más extremas las diferencias entre las máximas y las mínimas. El año 2022 fue ligeramente más caluroso frente al 2023, especialmente en los meses de calor. En relación con las precipitaciones, durante el verano de 2023 hubo falta de lluvias, mientras que los dos meses consecutivos fueron especialmente lluviosos. En consecuencia, tanto 2022 como 2023 presentan características compatibles con la existencia de altos niveles de O<sub>3</sub>, especialmente en época de verano.

#### 4.2. Perfiles verticales en distintas épocas climáticas

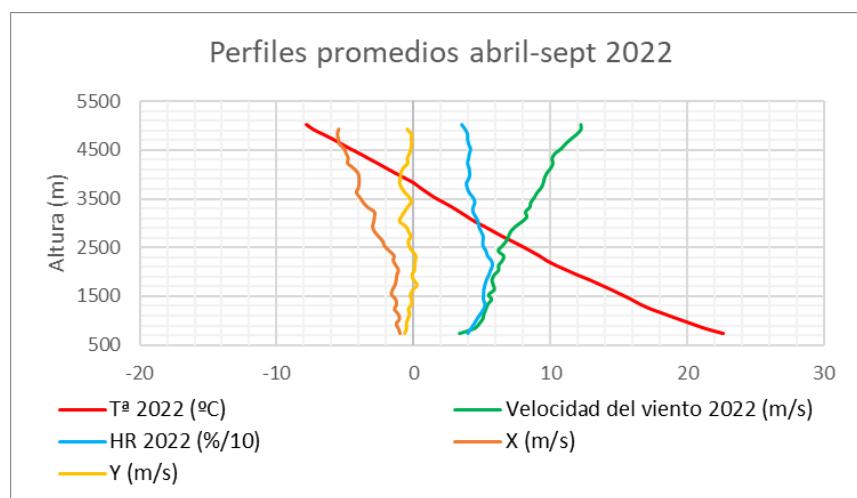
Se han construido perfiles promedio de O<sub>3</sub> y del resto de parámetros que ofrecen los ozono-sondeos hasta los 5000 m s.n.m. Estos perfiles se han realizado promediando los valores cada 100 m. Además, se han agrupado los días por época climática de la siguiente forma:

- Categoría 1 (meses de frío): enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre.

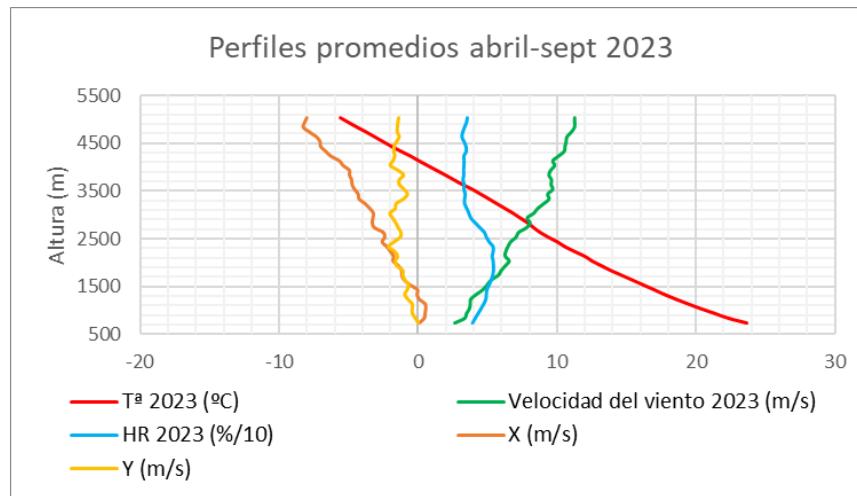
- Categoría 2 (meses de calor): abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre.

#### 4.2.1. Perfiles de parámetros meteorológicos

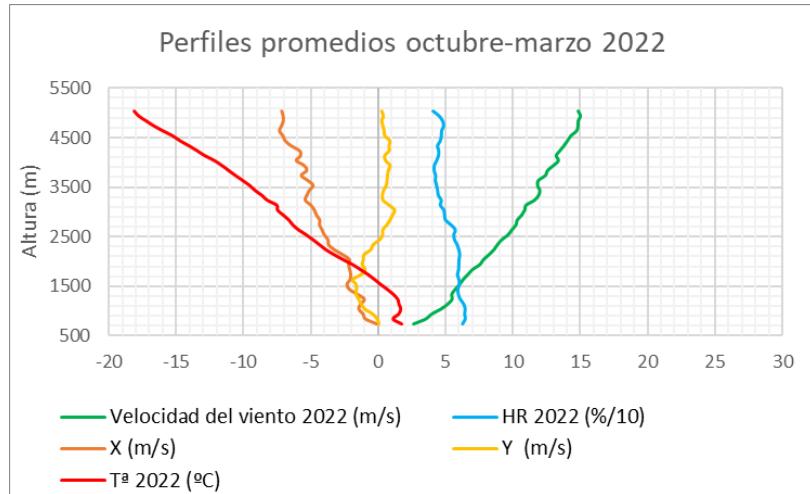
Con las dos categorías anteriores, se puede atribuir las concentraciones de ozono tanto al momento del año como a su meteorología característica. Los valores promedio de los parámetros meteorológicos para las dos categorías climáticas se presentan en las gráficas 4-7.



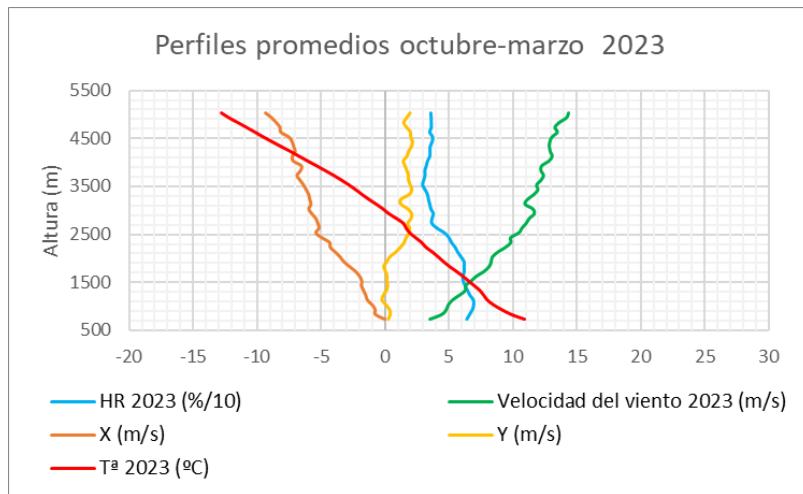
Gráfica 4: perfiles promedios de variables meteorológicas en el periodo abril-septiembre de 2022.



Gráfica 5: perfiles promedios de variables meteorológicas en el periodo abril-septiembre de 2023.



Gráfica 6: perfiles promedios de variables meteorológicas en el periodo octubre-marzo de 2022.



Gráfica 7: perfiles promedios de variables meteorológicas en el periodo octubre-marzo de 2023.

Como se puede observar en las gráficas la humedad relativa siempre es más alta en superficie ya que es la capa de la atmósfera en contacto con las fuentes de humedad de la superficie terrestre (masas de agua, vegetación, etc).

La velocidad del viento tiene una tendencia totalmente contraria a la humedad relativa, siendo más baja en la superficie y creciendo en altura, principalmente debido a la orografía del terreno que frena este viento. Esta variable es muy parecida ambos años, tanto en los meses de frío como en los de calor, aunque se observan velocidades algo más bajas a todas las alturas en los meses cálidos.

En cuanto al viento, la variable X que indica la componente horizontal, es decir, el viento en el eje este-oeste, es más fuerte en altura, coherentemente con la velocidad de viento total. La componente Y (norte-sur) varía más tanto en los meses de calor como de frío, y tiene valores mucho más bajos. Esto significa que la componente este-oeste

domina claramente y marca la dirección principal del viento tanto en superficie como en altura.

La variabilidad de la dirección del viento al subir en la atmósfera es algo diferente en los meses de calor y en los de frío. En abril-septiembre la dirección dominante en superficie y en altura es NW, esto implica que la componente Y del viento es, aunque moderada, negativa y por lo tanto sopla desde el norte. Como la componente X aumenta con la altura, en las cotas superiores de la atmósfera, domina la componente W. En los meses de octubre-marzo, en los primeros 1500-1700 m, la componente es W-NW (valores de Y negativos) mientras que en altura domina el W-SW.

Sobre la temperatura cabe destacar la diferencia entre los meses de frío de 2022 y 2023. En superficie, durante el 2023 son mucho más altas, esto llama la atención ya que con los datos de superficie del apartado 4.1 no se ve una diferencia tan clara. En todo caso debemos tener en cuenta que la muestra de días con sondeos es más sesgada que la usada para construir el gráfico 2. Con respecto a los meses de frío, llama la atención unas temperaturas más bajas en superficie en 2022 que en 2023.

#### 4.2.2. Capa de mezcla y factor de ventilación

Se ha calculado el espesor de la capa de mezcla, en la que se produce la mezcla de los contaminantes por movimientos convectivos. Este cálculo se realiza con los datos proporcionados por los ozono-sondeos y los cálculos correspondientes están explicados en el método presentado en la sección 3.1.1. A partir de los valores estimados de la altura de la capa de mezcla, se ha obtenido el valor del factor de ventilación tal como se detalla también en la sección 3.1.1.

En la siguiente tabla se presentan los valores promedio obtenidos para los períodos fríos y de calor:

	Meses de frío			Meses de calor		
	CM (m)	FV ( $m^2/s$ )	Velocidad del viento promedio (m/s)	CM (m)	FV ( $m^2/s$ )	Velocidad del viento promedio (m/s)
2022	1090,96	4280,91	3,63	1842,88	9344,38	4,75
2023	1173,43	5350,66	4,10	1765,68	7067,29	3,72

Tabla 1:valores promedio para los períodos cálidos y fríos de altura de capa de mezcla, factor de ventilación y velocidad del viento.

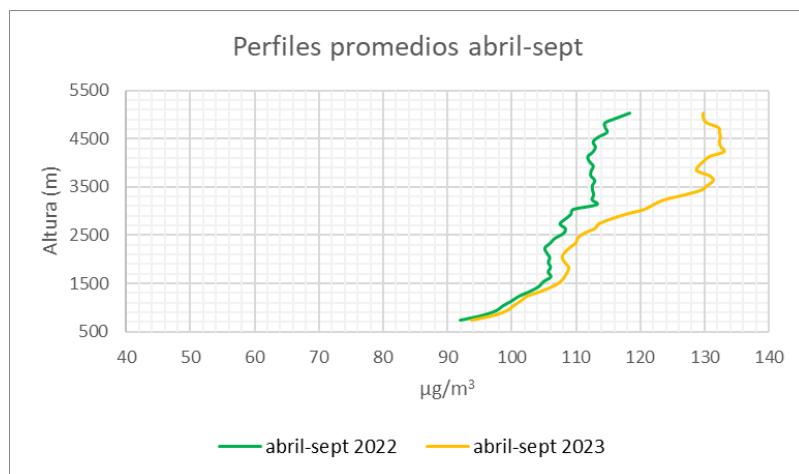
Como se observa en la tabla 1, las medias de los meses de frío frente a las de los meses de calor indican que la capa de mezcla (m) sube más cuanto mayor sea la radiación solar y el calentamiento de la superficie terrestre favoreciendo los movimientos

convectivos, es decir, durante los meses cálidos. El factor de ventilación también es superior en los meses de calor debido a que la capa de mezcla es más alta y los contaminantes disponen de una mayor capacidad de dispersarse en la vertical. Esto, sin embargo, no significa que en la horizontal suceda lo mismo. De hecho, en invierno puede haber días con viento fuerte que darían lugar a una ventilación eficiente incluso con alturas de capa de mezcla más reducidas.

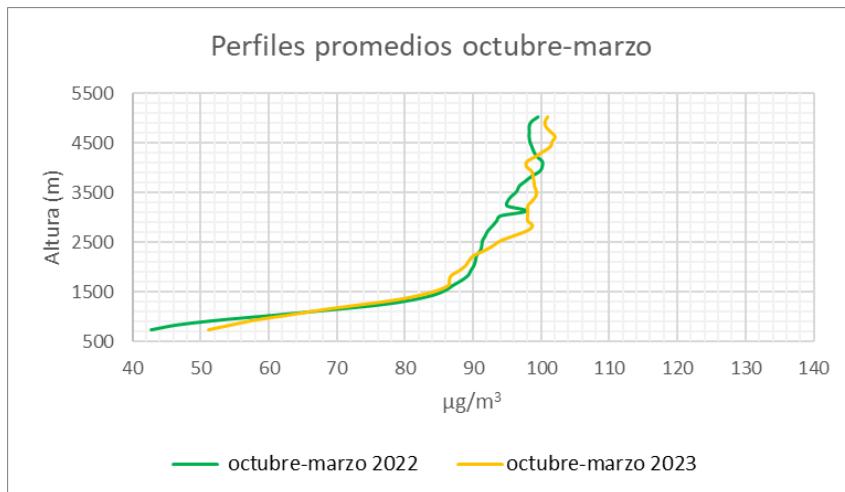
Cabe destacar la diferencia entre el factor de ventilación durante los meses de calor del 2022 y el 2023. Este último año, representa un factor de ventilación, así como una altura de la capa de mezcla más baja, dejando menos espacio a las partículas para expandirse. Esto provoca que los contaminantes se dispersen menos y por lo tanto se produzca una acumulación de estos, produciéndose los episodios de contaminación tan característicos de los meses de verano. El año 2023 tuvo más episodios, donde las concentraciones superan los  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , convirtiéndose en concentraciones altamente peligrosas.

#### 4.2.3. Ozono en la vertical

Una vez descrita la variabilidad de los parámetros meteorológicos en la vertical, se van a interpretar los perfiles verticales de  $\text{O}_3$ . A continuación, se muestran las gráficas 8 y 9 las cuales comparan las concentraciones promedio de  $\text{O}_3$  de los meses de frío y los meses de calor.



Gráfica 8: perfiles promedio de  $\text{O}_3$  en el periodo abril-septiembre de 2022 y 2023.



Gráfica 9: perfiles promedio de  $\text{O}_3$  en el periodo octubre-marzo de 2022 y 2023.

En general los niveles de  $\text{O}_3$  crecen con la altura debido a varias razones. En primer lugar, en altura se reducen los procesos de destrucción del ozono por titración ya que no hay fuentes de  $\text{NO}$ . Además, la deposición de  $\text{O}_3$  es prácticamente nula en altura y, por último, el transporte vertical por encima de la capa de mezcla es mucho menos eficiente lo que hace que el  $\text{O}_3$  a esas alturas tenga un mayor tiempo de residencia.

En los meses fríos los perfiles de ambos años son muy parecidos, sin embargo, los de calor varían mucho. En los meses más calurosos, hay diferencias apreciables entre ambos años.

En los meses de frío se observa una estabilización del  $\text{O}_3$  a partir de los 1500m donde la pendiente de crecimiento de las concentraciones con la altura se modera considerablemente. Esto se puede relacionar con la dirección del viento, ya que en el momento en el que pasan a ser vientos de suroeste se estabilizan significativamente. Como se ha comentado, los perfiles de invierno promedio en 2022 y 2023 son análogos, pero los niveles en superficie son algo mayores en 2023.

Durante los meses de calor los niveles de  $\text{O}_3$  son más elevados en todas las alturas estudiadas como es lógico por una mayor formación de  $\text{O}_3$  en esta época. Además, por el desarrollo de corrientes convectivas, el  $\text{O}_3$  en superficie se acumula en capas más altas. En ocasiones estas capas pueden ser de alta concentraciones y permanecer durante varios días aportando  $\text{O}_3$  a niveles de superficie por fumigación en las horas de mayor desarrollo de la capa de mezcla.

En este sentido, es interesante señalar una característica propia de los perfiles promedio de verano de ambos años de la gráfica 8 que consiste en la aparición de un máximo relativo de concentraciones hacia los 1700 m s.n.m. Este pico refleja la

existencia de capas de acumulación de ozono a esa altura de manera común durante el verano.

#### **4.3. Perfiles verticales por nivel de concentración en superficie**

Análogamente al estudio de los perfiles verticales de ozono y el resto de parámetros meteorológicos desagregando por periodo climático, en esta sección se realiza el estudio equivalente, pero desagregando por niveles de O<sub>3</sub> en estaciones de calidad del aire de Madrid.

Para ello se han categorizado en tres grupos los días en los que se realizaron ozono-sondeos en los años 2022 y 2023 calculando el promedio de los máximos diarios (PMD) de O<sub>3</sub> registrados en las 13 estaciones de calidad del aire de Madrid en las que se mide este contaminante.

Para dividir los días con ozono-sondeo en tres grupos con una cantidad similar de elementos, se han calculado los percentiles P33 y P66 de los PMD. Estos valores coinciden, aproximadamente con 75 µg/m<sup>3</sup> (P33) y 104 µg/m<sup>3</sup> (P66) de tal forma que los días se han clasificado de acuerdo al valor del PMD de O<sub>3</sub> según este sea menor de 75 µg/m<sup>3</sup>, se encuentre entre 75 y 104 µg/m<sup>3</sup> o sea mayor de 104 µg/m<sup>3</sup> (tabla 2). Lógicamente, los días de la categoría de concentraciones bajas son más frecuentes en los meses de invierno mientras los de la categoría de concentraciones altas suelen corresponder al periodo de verano.

A continuación, se exponen las tablas con los rangos de concentraciones dependiendo del mes y del año.

µg/m <sup>3</sup>
PMD <75
PMD 75-104
PMD >104

Tabla 2: clasificación para las tablas 3 y 4 según la concentración de O<sub>3</sub>.

Ozono-sondeos 2022	
Enero	68,63
	66,91
	43,13
	69,06
Febrero	56,38
	70,17
	71,62
	68,92
Marzo	78,83
	72,70
	68,68
	78,28
	89,70
Abril	90,43
	84,79
	88,33
	83,23
Mayo	89,54
	121,91
	117,79
	88,49
Junio	76,89
	76,93
	111,29
	81,01
	110,82
Julio	129,91
	178,86
	153,58
	117,30
Agosto	136,70
	106,88
	129,85
	108,59
Septiembre	87,65
	72,99
	121,51
	75,57
Octubre	108,75
	93,50
	73,37
	47,71
Noviembre	62,59
	75,02
	66,03
	63,33
	37,57
Diciembre	50,71
	84,67
	65,81
	42,74

Tabla 3: PMD de O<sub>3</sub> en las estaciones de calidad del aire de Madrid en días con ozono-sondeos durante el 2022.

Ozono-sondeos 2023	
Enero	49,00
	41,38
	73,69
	63,69
Febrero	64,15
	99,69
	81,85
	78,08
Marzo	85,15
	83,92
	85,31
	106,31
Abril	92,54
	85,23
	86,77
	116,92
Mayo	121,62
	103,69
	104,62
	111,62
Junio	91,92
	121,23
	107,31
	197,62
Julio	126,23
	138,46
	101,15
	164,08
Agosto	103,15
	144,69
	126,92
	124,38
	121,77
Septiembre	117,08
	111,46
	101,23
	112,92
Octubre	105,25
	107,67
	71,67
	64,00
Noviembre	77,33
	64,42
	27,75
	70,25
Diciembre	68,23
	72,00
	76,85
	29,46

Tabla 4: PMD de O<sub>3</sub> en las estaciones de calidad del aire de Madrid en días con ozono-sondeos durante el 2023.

#### 4.3.1. Perfiles de parámetros meteorológicos

Tras la clasificación de los días por rango de concentraciones en superficie, se han confeccionado también los perfiles promedio de los parámetros meteorológicos de los sondeos. Estos perfiles promedio se muestran en las gráficas 10, 11 y 12.

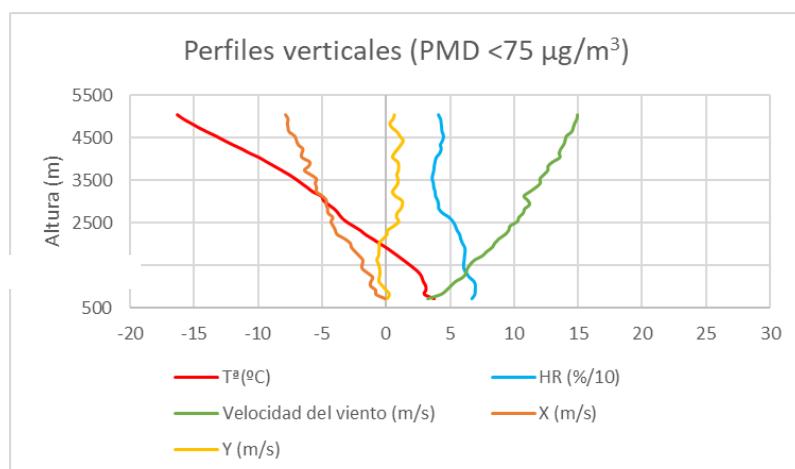
Las diferencias en los perfiles de humedad relativa en los tres grupos son poco significativas, aunque se puede observar que la humedad es varía inversamente con la concentración en superficie, a mayor concentración, menor HR en vertical.

La temperatura tanto en superficie como en altura claramente crece a medida que lo hace la concentración de O<sub>3</sub> en superficie lo que resulta lógico, ya que las temperaturas más elevadas se registran en verano.

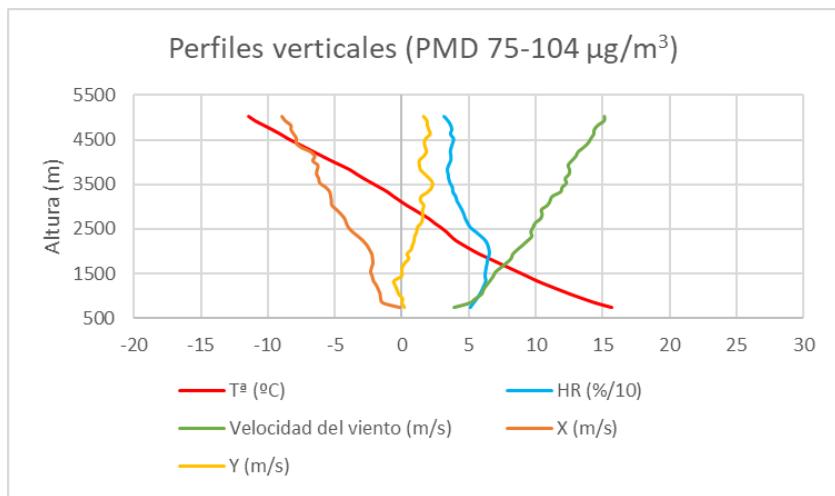
La velocidad del viento absoluta a lo largo de toda la vertical es más baja en los días con concentraciones en superficie más altas. Unas velocidades de viento más bajas pueden reflejarse en más capacidad de acumulación tanto en superficie como en altura. En los conjuntos de días con concentraciones en superficie bajas y medias los perfiles promedio de velocidad absoluta de viento son similares, aunque los días con concentraciones de entre 75 y 104 µg/m<sup>3</sup>, tienen un viento ligeramente mayor en superficie.

Por último, en cuanto a la dirección del viento, en las dos primeras categorías predominan los vientos de oeste en superficie, mientras que en altura pasa a ser de noroeste. Por otra parte, la gráfica con las mayores concentraciones (>104 µg/m<sup>3</sup>) en altura pasan a ser de suroeste, siendo menos intensos que los anteriores.

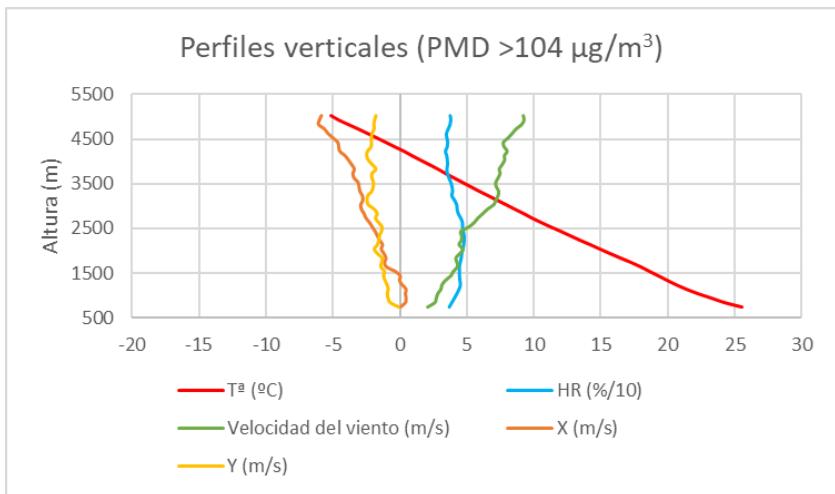
A continuación, se presentan las gráficas de las variables meteorológicas comentadas, categorizando los días de <75 µg/m<sup>3</sup>, los que van de 75-104 µg/m<sup>3</sup> y por último los >104 µg/m<sup>3</sup>, para ambos años juntos.



Gráfica 10: perfiles promedios de parámetros meteorológicos para días de bajas concentraciones de O<sub>3</sub> en Madrid (PMD <75 µg/m<sup>3</sup>)



Gráfica 11: perfiles promedios de parámetros meteorológicos para días de bajas concentraciones de O<sub>3</sub> en Madrid (PMD 75-104 µg/m<sup>3</sup>)



Gráfica 12: perfiles promedios de parámetros meteorológicos para días de bajas concentraciones de O<sub>3</sub> en Madrid (PMD >104 µg/m<sup>3</sup>)

#### 4.3.2. Capa de mezcla y factor de ventilación

Se han calculado los promedios de las tres categorías por nivel de concentración en superficie de la altura de la capa de mezcla y del factor de ventilación. En la tabla 5 se presentan los resultados de estos cálculos.

	CM (m)	FV (m <sup>2</sup> /s)	Velocidad del viento promedio (m/s)
PMD <75	1111,0	5450,1	4,2
PMD 75-104	1620,1	9312,4	5,4
PMD >104	1692,9	5250,0	3,0

Tabla 5: valores promedio para las categorías por concentración en superficie de altura de capa de mezcla, factor de ventilación y velocidad del viento.

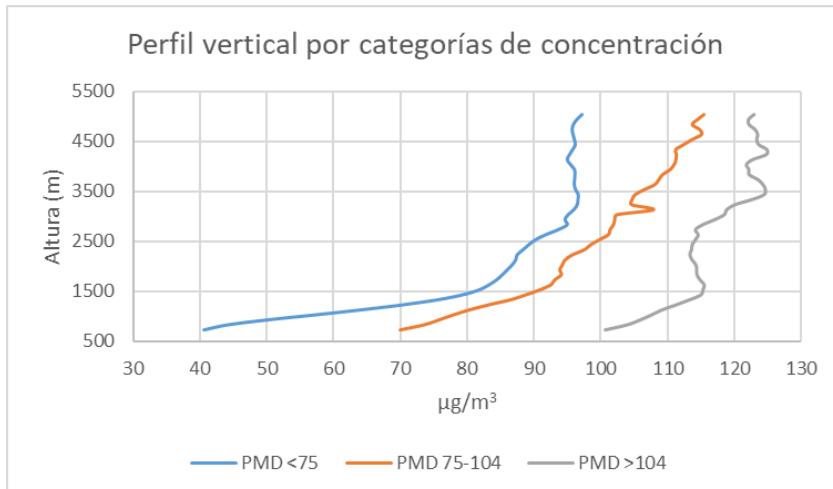
Como se observa en la tabla, la altura de la capa de mezcla llega a mayores alturas los días con mayores concentraciones de ozono, siendo estos principalmente durante los meses de verano, por lo que el calor juega un papel importante en el desarrollo de la capa de mezcla. Por otro lado, la velocidad del viento promedio en la capa de mezcla de estos días de altas concentraciones es la más baja, impidiendo el transporte de los contaminantes de manera eficaz. Ello hace que el factor de ventilación en la categoría de concentraciones altas sea el más bajo de las tres.

En los días de concentraciones más bajas destaca el bajo valor promedio de la altura de capa de mezcla ya que estos días son más habituales en época de otoño e invierno con temperaturas más bajas lo que genera menos movimientos convectivos.

La capa de mezcla en los días de la categoría de concentraciones medias (PMD entre 75 y 104  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) es casi tan profunda en promedio como en el grupo de concentraciones altas pero una mayor velocidad del viento promedio da lugar a un factor de ventilación superior.

#### 4.3.3. Ozono en la vertical

Por último, dentro de este apartado de ozono en superficie, se analizan los perfiles verticales de  $\text{O}_3$  dependiendo de las concentraciones en superficie, categorizado de la misma manera que durante todo este apartado.



Gráfica 13: perfiles verticales de  $\text{O}_3$  según niveles de concentración en superficie.

Como se observa en la gráfica 13, la primera categoría PMD<75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , supera ligeramente los 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la superficie, creciendo rápidamente hasta los 1500 m s.n.m. para moderar luego su crecimiento estabilizándose en los 95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a partir de los 2700 m s.n.m. La segunda categoría, PMD en el rango 75-104  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , tiene unos perfiles promedio con concentraciones que crecen con mucha pendiente desde los 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , en superficie hasta los 95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  hacia los 1700 m s.n.m. para luego, de una forma más moderada, subir hasta alcanzar los 115  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . En esencia estas dos categorías tienen perfiles verticales promedio de O<sub>3</sub> similares en forma, aunque diferentes concentraciones.

Los días con los niveles más elevados en superficie muestran perfiles promedio de O<sub>3</sub> algo diferentes no sólo por las concentraciones absolutas más altas que en las otras dos categorías sino también por la forma del perfil. La acumulación de O<sub>3</sub> en las capas más bajas de la troposfera es clara mostrando un máximo relativo marcado hacia los 1500 m s.n.m. Esta característica ya se intuía en los perfiles agrupados por época climática de verano, pero de estos datos se puede concluir que es un patrón propio de los días con altas concentraciones de O<sub>3</sub>. La acumulación de O<sub>3</sub> en alturas moderadas hace susceptible que pueda ser transportado a la superficie por fumigación cuando la capa de mezcla se desarrolla lo suficiente convirtiéndose en un proceso que aumenta las concentraciones en la superficie.

#### 4.3.4. Perfiles de episodios extremos de contaminación por ozono

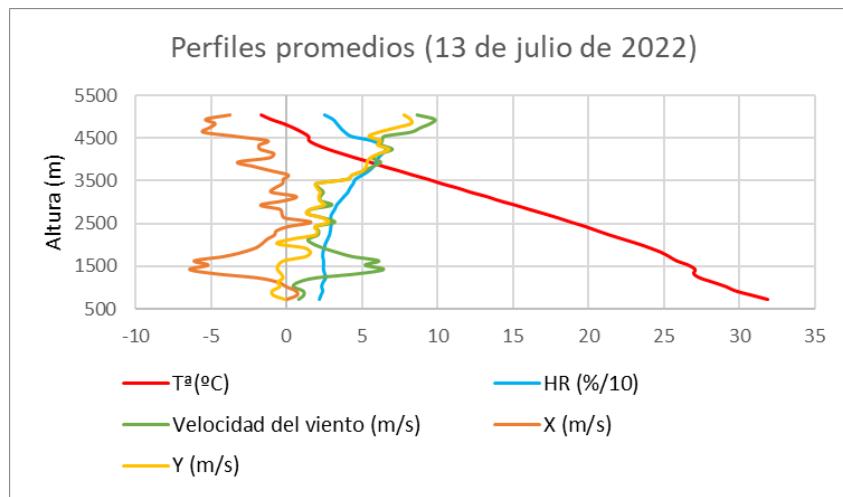
En esta sección se va a hacer un análisis específico de dos episodios de O<sub>3</sub> en la ciudad de Madrid en cuanto al comportamiento en vertical del propio ozono y el resto de parámetros meteorológicos.

Los dos episodios de contaminación severa de ozono en la ciudad de Madrid sucedieron el 13 de julio de 2022 y entre el 23 y el 28 de junio de 2023. Durante estos episodios se superó el umbral de información de ozono (180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en al menos alguna de las 13 estaciones de calidad del aire de la ciudad de Madrid (Ayuntamiento de Madrid, s. f.-b). Aunque en el bienio estudiado se registraron más episodios de superación, sólo se dispone de ozono-sondeos realizados en días de estos dos episodios, en particular el 13 de julio de 2022 y el 28 de junio de 2023.

##### Episodio del 13 de julio de 2022

En la gráfica 14, se representan las variables meteorológicas del sondeo realizado el 13 de julio de 2022. Este día tuvo unas temperaturas muy altas que superan los 30°C

en superficie a las 13h. La velocidad del viento en la superficie es muy baja, teniendo una crecida abrupta sobre los 1500 m, esto coincide con la altura de la capa de mezcla que se comentará después. La humedad relativa es baja, sobre todo en superficie y, contrariamente a lo habitual, crece en los niveles altos. Los vientos son predominantes de W-NW, aunque en los primeros metros, pegados a la superficie, son de sureste lo que tampoco es lo habitual según lo comprobado en la descripción de los perfiles promedio.



Gráfica 14: perfiles promedios de las variables meteorológicas el 13 de julio de 2022.

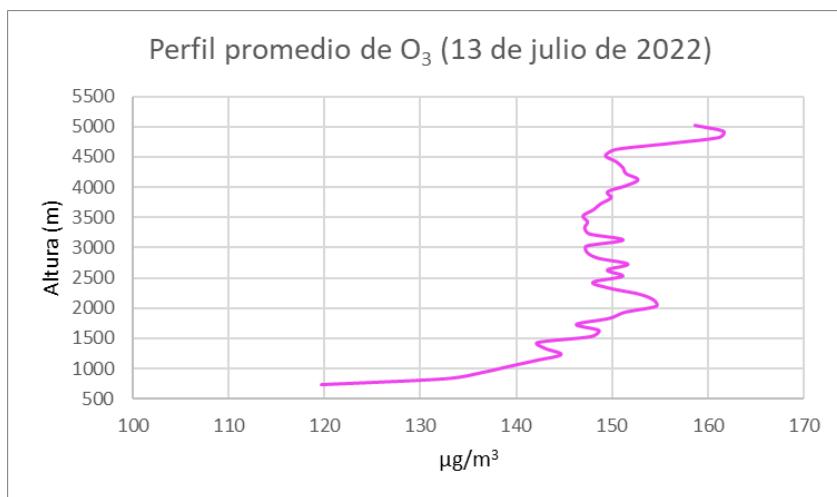
El episodio del 13 de julio supera a los demás días, teniendo en muchas de las estaciones, una doble crecida a la tarde. El primer pico viene después de los máximos en radiación local (sobre las 14h), sin embargo, el segundo pico que se ve en muchas de las estaciones, son masas de aire transportadas.

En cuanto a la altura de la capa de mezcla (tabla 6), esta llega a una altura de algo más de 1300 metros s.n.m. siendo la velocidad promedio en la capa de mezcla de tan solo 0,96 m/s. Esto llama la atención debido a que la capa de mezcla es más alta en los meses de calor, sin embargo, este día es considerablemente más baja. Esta altura de la capa de mezcla se encuentra justo por debajo del límite a partir del cual empieza a subir la velocidad del viento de manera abrupta (gráfica 14). Por último, cabe destacar el factor de ventilación este día es de 1294 m<sup>2</sup>/s, la cual se sitúa en valores muy bajos en comparación con el promedio de esta época del año que se sitúa en 9344 m<sup>2</sup>/s. De esta manera, y debido a la baja velocidad del viento, así como la altura de la capa, los contaminantes se quedan estancados en la capa de mezcla, sin ser transportados, produciéndose una acumulación de las concentraciones, que favorecen la formación de estos episodios.

	CM (m)	FV ( $m^2/s$ )	Velocidad del viento (m/s)
13-jul-22	1335	1294,7	0,97

Tabla 6: capa de mezcla, factor de ventilación y velocidad del viento durante el episodio del 13 julio 2022.

En cuanto a las concentraciones del contaminante mostradas en la gráfica 15, las mediciones de los ozono-sondeos, representan valores altos ya en la superficie (unos  $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), así como en altura creciendo mucho hasta unos 1250 metros de altura. Esta altura coincide con la capa de mezcla calculada que se expresará a continuación. Por encima se estabilizan las concentraciones en el entorno de los  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .



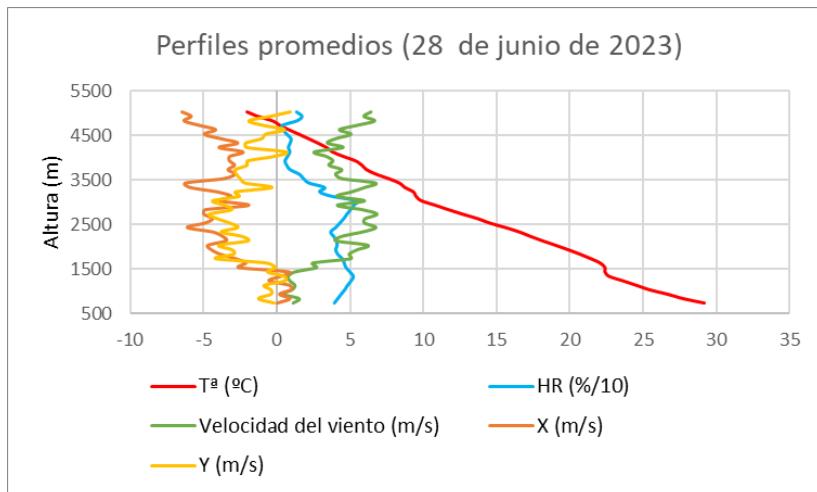
Gráfica 15: perfil vertical de O<sub>3</sub> durante el episodio del 13 de julio de 2022.

Debemos tener en cuenta que los ozono-sondeos se lanzan en las horas centrales del día mientras que los máximos en las estaciones de superficie se producen a partir de las 15h UTC. Se superan los  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la estación de calidad del Pardo, incluso llegando a los  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en superficie. En otras estaciones como la de Plaza del Carmen también se llega a los  $199 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , así como Barajas, Escuelas Aguirre o Villaverde, que también superan los  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante la tarde. Las capas superiores de los ozono-sondeos pueden haber sido transportadas a capas más bajas gracias al desarrollo de la capa de mezcla, subiendo la concentración en superficie unas horas después. El incremento de la radiación solar durante el día, así como su acumulación también explica que las concentraciones en superficie aumenten durante la tarde.

### Episodio del 23 al 28 de junio de 2023

De este episodio que duró 5 días, sólo se tienen datos de ozono-sondeo del 28 de junio. En la gráfica 16 se presentan los perfiles verticales de los parámetros meteorológicos de ese día.

La temperatura este día de episodio también fue alta, casi alcanzando los 30° C en superficie a la hora del sondeo lo que favorece la formación de O<sub>3</sub> troposférico. La humedad relativa es moderada (40-50%) hasta los 3000 m s.n.m., cayendo por encima de esa cota. Con la velocidad del viento sucede algo muy parecido al episodio del 13 de julio de 2022 ya que en superficie es muy bajo, creciendo en altura, al superar los 1500 m, relacionándose esto con la altura de la capa de mezcla. En todo caso, no se registran velocidades muy altas de viento a ninguna altura. La dirección del viento es sureste en superficie, mientras que en altura cambia totalmente a suroeste.



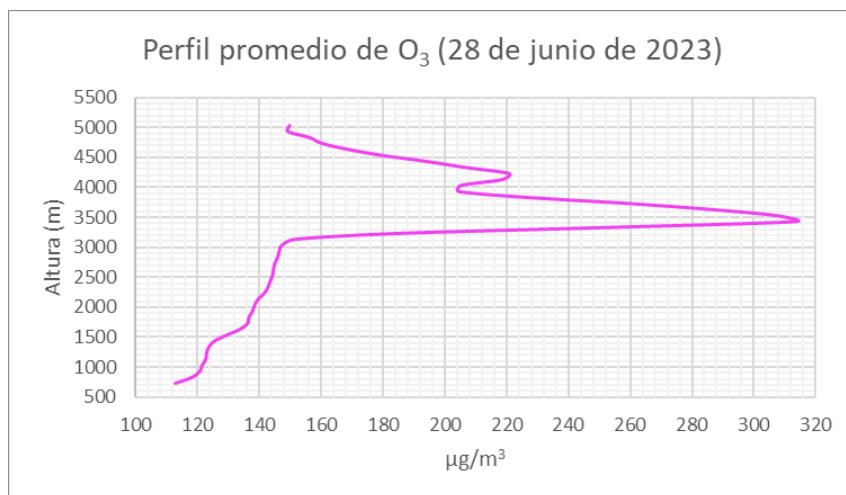
Gráfica 16: perfiles promedios de las variables meteorológicas el 28 de junio de 2023.

Se ha analizado también la altura de la capa de mezcla y el factor de ventilación para el día 28 de junio (tabla 7). Análogamente al episodio descrito anteriormente, la capa de mezcla alcanzó alturas bajas frente al promedio de estas fechas (1259 m) y el promedio de velocidad dentro de la misma fue baja (0,60 m/s). Esta combinación da lugar a un factor de ventilación considerablemente bajo (760 m<sup>2</sup>/s) frente al valor promedio durante los meses de calor (7067 m<sup>2</sup>/s) lo que favorece a la acumulación del O<sub>3</sub>.

	CM (m)	FV (m <sup>2</sup> /s)	Velocidad del viento (m/s)
28-jun-23	1259	760,8	0,60

Tabla 7: capa de mezcla, factor de ventilación y velocidad del viento durante el episodio del 28 de junio de 2023.

Respecto al perfil vertical de  $O_3$  durante este episodio, esta gráfica es muy distinta a la del episodio del año 2022. En superficie se observaron niveles moderadamente altos ( $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y se observa un crecimiento en altura mucho menos exponencial hasta unos 3000 m de altura. Justo por encima de ese nivel aparece una capa de reserva de  $O_3$  de una magnitud muy importante ya que alcanza hasta los  $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esta capa pudo haberse conformado por procesos de recirculación durante los 4 días anteriores del episodio. No se puede saber si la capa de mezcla pudo haberse desarrollado hasta esa altura a lo largo del día (recordemos que el ozono-sondeo se lanza a las 12 UTC y el máximo desarrollo de la capa de mezcla se produce más tarde). En el caso de que eso sucediese, el  $O_3$  de la capa de reserva podría haber contribuido a los niveles en superficie.



Gráfica 17: perfil vertical de  $O_3$  durante el episodio del 28 de junio de 2023.

## **5. Conclusiones**

En el presente TFG se han empleado datos de ozono-sondeos realizados durante 2022 y 2023 en Madrid para estudiar la fenomenología del O<sub>3</sub> en la vertical en la zona de estudio. Los ozono-sondeos se han realizado cada miércoles alrededor de la 12 UTC de tal forma que se han analizado más de 100 sondeos. Además de las concentraciones de O<sub>3</sub>, en los sondeos se obtienen perfiles de velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa que se analizan y permiten calcular parámetros fundamentales como la altura de capa de mezcla o el factor de ventilación. Se ha estudiado la variabilidad vertical del ozono y del resto de parámetros meteorológicos por época del año y por nivel de concentración en superficie, incluyendo un análisis detallado de dos episodios extremos de contaminación por O<sub>3</sub>.

Los resultados de este TFG demuestran la gran dependencia del ozono troposférico con las variables meteorológicas. La radiación solar, que conlleva un aumento de las temperaturas, crea una estacionalidad muy marcada, destacando los meses de calor en relación con las altas concentraciones de O<sub>3</sub>. Existe una correlación positiva de la temperatura con los niveles de O<sub>3</sub>, pero y precipitación no explican al 100% lo distintos que son ambos años en cuanto a concentraciones de ozono, siendo 2023 un año más crítico que, sin embargo, tuvo temperaturas más suaves y más precipitaciones que el 2022, lo que harían pensar que, durante el 2023, habría una bajada de concentraciones frente al año anterior.

Se reconoce que el ozono troposférico depende de tres factores: su formación y destrucción química, así como su transporte. Su formación y destrucción depende de la presencia de sus precursores en la atmósfera, sin embargo, el transporte depende directamente del viento, siendo una de las variables meteorológicas más destacables durante todo el trabajo, influyendo en el factor de ventilación y la capa de mezcla.

La capa de mezcla se caracteriza por ser más alta durante los meses de calor, debido a una mayor radiación solar que favorece los movimientos verticales convectivos y generan un desarrollo más profundo de la capa de mezcla. Sin embargo, destacan los bajos valores tanto de la altura de la capa de mezcla, como del factor de ventilación durante los episodios de contaminación. Los episodios más extremos de O<sub>3</sub> durante 2022 y 2023 en Madrid ocurrieron en época de verano en condiciones de vientos suaves y alturas de capa de mezcla bajas lo que, combinando ambas circunstancias, dieron lugar a factores de ventilación muy reducidos.

Otro aspecto que es importante en la vertical durante episodios de alto ozono es la formación de capas de reserva que contienen altas concentraciones de O<sub>3</sub> y se ubican

típicamente entre los 1500-2000 m s.n.m. Estas capas de reserva se forman por procesos de recirculación y desacoplamiento de masas de aire el o los días anteriores. En las horas de máximo desarrollo de la capa de mezcla esta puede incorporar ozono de estas capas de reserva aumentando la concentración en superficie por fumigación vertical.

Es importante reflexionar sobre la influencia que el cambio global va a tener sobre las concentraciones de O<sub>3</sub>, especialmente en la zona Mediterránea, muy sensible al aumento de temperaturas y, en consecuencia, a un aumento en la frecuencia, duración e intensidad de los episodios de contaminación por O<sub>3</sub>.

En vista de lo anterior, se debe seguir investigando ya que el cambio climático cada vez es más real con el aumento de las temperaturas en todo el planeta. Debido al aumento de la frecuencia de los episodios de contaminación, se propone como futura línea de investigación basada en un estudio exhaustivo de estos días para ver cómo afecta a la salud pública, ya que las concentraciones a las que se llegan pueden llegar a ser muy peligrosas. Otra línea de investigación interesante para el futuro sería la relación del ozono troposférico con las concentraciones de sus precursores, ya que la reducción de estos sería altamente beneficioso. Pudiendo llegar a ver si las políticas de reducción del transporte privado, así como las subvenciones al transporte público están teniendo un efecto positivo.

## **6. Bibliografía**

Agencia Estatal de Meteorología. (s. f.). Resúmenes climatológicos - Página 1: Comunidad de Madrid - C. Autónomas - Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. Recuperado 22 de junio de 2024, de [https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/resumenes?w=1&k=mad](https://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/resumenes?w=1&k=mad)

Agencia Europea de Medio Ambiente. (s. f.). Ozono troposférico [Página]. Recuperado 14 de mayo de 2024, de <https://www.eea.europa.eu/es/publications/92-828-3351-8/page005.html>

Aranzazu Gómez Garay et al. (2012). Efectos sobre la fotosíntesis por exposición a ozono en especies leñosas. REDUCA, 5(2), 25-33.

Ayuntamiento de Madrid. (s. f.-a). Calidad del aire. Estaciones de control—Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid. Recuperado 11 de junio de 2024, de <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/menuitem.c05c1f754a33a9fbe4b2e4b284f1a5a0/?vgnextoid=9e42c176313eb410VgnVCM1000000b205a0aRCRD&vgnextchannel=374512b9ace9f310VgnVCM100000171f5a0aRCRD>

Ayuntamiento de Madrid. (s. f.-b). Informes sobre episodios de contaminación por ozono troposférico—Portal de Calidad del aire. Recuperado 22 de mayo de 2024, de <https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Bases-de-datos-y-publicaciones/Boletines-memorias-e-informes/Informes-sobre-episodios/Informes-sobre-episodios-de-contaminacion-por-ozono-troposferico/?vgnextfmt=default&vgnextoid=a9c358eba0daf710VgnVCM1000001d4a900aRCRD&vgnextchannel=66ce471c5c503710VgnVCM1000008a4a900aRCRD>

Ayuntamiento de Madrid. (s. f.-c). Red de estaciones de vigilancia de calidad del aire—Portal de Calidad del aire. Recuperado 20 de mayo de 2024, de <https://airedemadrid.madrid.es/portales/calidadaire/es/Actuaciones-municipales/Sistema-integral-de-calidad-del-aire/Vigilancia/Red-de-estaciones-fijas-de-control-de-calidad-del-aire/?vgnextfmt=default&vgnextoid=aeaca16d591bbf710VgnVCM2000001f4a900aRCRD&vgnextchannel=a77e471c5c503710VgnVCM1000008a4a900aRCRD>

Centro De Investigación Atmosférica de IZAÑA. (s. f.). Reactive gases and Ozonosondes –. Recuperado 16 de mayo de 2024, de <https://izana.aemet.es/reactive-gases-ozonosondes/>

Centro de Investigaciones, Energéticas & Medioambientales y Tecnológicas. (s. f.). Ozono troposférico. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado 17 de mayo de 2024, de

[https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques/red\\_ozono.html](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques/red_ozono.html)

Christopher S. Malley, Daven K. Henze, et al. (2017, agosto 28). Updated Global Estimates of Respiratory Mortality in Adults ≥30 Years of Age Attributable to Long-Term Ozone Exposure | Environmental Health Perspectives | Vol. 125, No. 8. EHP Publishing. <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp1390>

Chu, W., Li, H., Ji, Y., Zhang, X., Xue, L., Gao, J., & An, C. (2024). Research on ozone formation sensitivity based on observational methods: Development history, methodology, and application and prospects in China. *Journal of Environmental Sciences*, 138, 543-560. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.02.052>

Consejería de Sostenibilidad, Medio Ambiente y Economía Azul. (s. f.). Emisiones de compuestos orgánicos volátiles—Portal Ambiental de Andalucía. CMAOT. Recuperado 8 de junio de 2024, de <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/atmosfera/emisiones-a-la-atmosfera/emisiones-de-compuestos-organicos-volatiles>

Cooper, O. R., Parrish, D. D., Ziemke, J., Balashov, N. V., Cupeiro, M., Galbally, I. E., Gilge, S., Horowitz, L., Jensen, N. R., Lamarque, J.-F., Naik, V., Oltmans, S. J., Schwab, J., Shindell, D. T., Thompson, A. M., Thouret, V., Wang, Y., & Zbinden, R. M. (2014). Global distribution and trends of tropospheric ozone: An observation-based review. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2, 000029. <https://doi.org/10.12952/journal.elementa.000029>

Dirección General de Calidad Ambiental del Gobierno de Aragón. (s. f.). Compuestos Orgánicos Volátiles. Portal del Gobierno de Aragón. Recuperado 8 de junio de 2024, de <https://www.aragon.es/-/compuestos-organicos-volatiles>

Dry Deposition of Ozone Over Land: Processes, Measurement, and Modeling—Clifton—2020—Reviews of Geophysics—Wiley Online Library. (s. f.). Recuperado 14 de mayo de 2024, de <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2019RG000670>

Escudero, M., Segers, A., Kranenburg, R., Querol, X., Alastuey, A., Borge, R., de la Paz, D., Gangoiti, G., & Schaap, M. (2019). Analysis of summer O<sub>3</sub> in the Madrid air basin with the LOTOS-EUROS chemical transport model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(22), 14211-14232. <https://doi.org/10.5194/acp-19-14211-2019>

European Environmental Agency. (2022, noviembre 24). Health impacts of air pollution in Europe, 2022—European Environment Agency [Briefing]. European

Environmental Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution>

European Environmental Agency. (2023, noviembre 21). Exposure of Europe's ecosystems to ozone. <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/exposure-of-europes-ecosystems-to-ozone>

Gil, S. (2006). Determinación del ozono atmosférico de las medidas de MIPAS/ENVISAT | DIGITAL.CSIC [Universidad de Granada]. <https://digital.csic.es/handle/10261/212431>

Hardacre, C., Wild, O., & Emberson, L. (2015). An evaluation of ozone dry deposition in global scale chemistry climate models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(11), 6419-6436. <https://doi.org/10.5194/acp-15-6419-2015>

iMiDRa. (2022). Reconocimiento de posibles síntomas de ozono en cultivos sensibles. 51.

Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. (s. f.). Estadísticas históricas. Climatología. Estación meteorológica de Retiro. Recuperado 23 de junio de 2024, de <https://www.madrid.org/iestadis/fijas/estructu/general/otros/clehre.htm>

Instituto de Salud Carlos III. (s. f.). Páginas—Patrón Nacional de Ozono. Recuperado 3 de junio de 2024, de <https://www.isciii.es/QueHacemos/Servicios/SanidadAmbiental/Paginas/Patr%C3%B3n-Nacional-de-Ozono.aspx>

Jiménez, J.F. (2016). Altura de la Capa de Mezcla en un área urbana, montañosa y tropical. Universidad de Antioquia.

Johnson, B. J., Oltmans, S. J., Vömel, H., Smit, H. G. J., Deshler, T., & Kröger, C. (2002). Electrochemical concentration cell (ECC) ozonesonde pump efficiency measurements and tests on the sensitivity to ozone of buffered and unbuffered ECC sensor cathode solutions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D19), ACH 8-1-ACH 8-18. <https://doi.org/10.1029/2001JD000557>

Kim, S.-Y., Kim, E., & Kim, W. J. (2020). Health Effects of Ozone on Respiratory Diseases. *Tuberculosis and Respiratory Diseases*, 83(Supple 1), S6-S11. <https://doi.org/10.4046/trd.2020.0154>

Kowalski, A. (s. f.). TEMA 3. AIRE SECO. AIRE HÚMEDO. (p. 62). Universidad de Granada. <https://www.ugr.es/~andyk/Docencia/Metclim/03.pdf>

Ministerio de Medio Ambiente. (s. f.). La atmósfera. Como la piel de una manzana.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.-a). Gases precursores de ozono troposférico. Recuperado 13 de mayo de 2024, de [https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases\\_precensores\\_ozono.html](https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/gases_precensores_ozono.html)

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.-b). Óxidos de Nitrógeno. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado 8 de junio de 2024, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.html>

Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestvedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Mendoza, B., Nakajima, T., Robock, A., Stephens, G., Zhang, H., Aamaas, B., Boucher, O., Dalsøren, S. B., Daniel, J. S., Forster, P., ... Shine, K. (2013). Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.

Olsen, M. A., Schoeberl, M. R., & Douglass, A. R. (2004). Stratosphere-troposphere exchange of mass and ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D24). <https://doi.org/10.1029/2004JD005186>

Paoletti, E. (2006). Impact of ozone on Mediterranean forests: A review. *Environmental Pollution*, 144(2), 463-474. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2005.12.051>

Parlamento Europeo. (2008, junio 11). BOE.es—DOUE-L-2008-81053 Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de mayo de 2008, relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=DOUE-L-2008-81053>

Parlamento Europeo. (2023, marzo 23). Cambio climático: Gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. Temas | Parlamento Europeo. <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20230316STO77629/cambio-climatico-gases-de-efecto-invernadero-que-causan-el-calentamiento-global>

PRTR España. (s. f.). NOx (Óxidos de nitrógeno) | PRTR España. Recuperado 8 de junio de 2024, de <https://ptr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>

Querol, X., Alastuey, A., Gangoiti, G., Perez, N., Lee, H. K., Eun, H. R., Park, Y., Mantilla, E., Escudero, M., Titos, G., Alonso, L., Temime-Roussel, B., Marchand, N., Moreta, J. R., Revuelta, M. A., Salvador, P., Artíñano, B., García dos Santos, S., Anguas, M., ... Ahn, K.-H. (2018). Phenomenology of summer ozone episodes over the Madrid Metropolitan Area, central Spain. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(9), 6511-6533. <https://doi.org/10.5194/acp-18-6511-2018>

Real Decreto 102/2011, de 28 de enero, relativo a la mejora de la calidad del aire, Pub. L. No. Real Decreto 102/2011, BOE-A-2011-1645 9574 (2011).  
<https://www.boe.es/eli/es/rd/2011/01/28/102>

Saavedra Vázquez, S. (2010). Caracterización de episodios de ozono troposférico en Galicia mediante la aplicación de distintas técnicas de simulación e interpretación de datos de campo [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidade de Santiago de Compostela]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=108970>

Sala Rey. F y Squadrito. G. (1992, diciembre). El ozono como oxidante de lípidos biológicos: Causas y efectos. Revista de Química, 6(2), 10.

Sergio Gil López. (2006). Determinación del ozono atmosférico de las medidas de MIPAS/ENVISAT. Universidad de Granada.

Sher. E. (1998). Photochemical Smog—An overview | ScienceDirect Topics. <https://www.sciencedirect.com/topics/earth-and-planetary-sciences/photochemical-smog>

Sillman, D. S. (s. f.). OVERVIEW: TROPOSPHERIC OZONE, SMOG AND OZONE-NO<sub>x</sub>-VOC SENSITIVITY. 9.

Sillman, S., & He, D. (2002). Some theoretical results concerning O<sub>3</sub>-NO<sub>x</sub>-VOC chemistry and NO<sub>x</sub>-VOC indicators. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 107(D22). <https://doi.org/10.1029/2001JD001123>

Smit, H et al. (2007). Assessment of the performance of ECC-ozonesondes under quasi-flight conditions in the environmental simulation chamber: Insights from the Juelich Ozone Sonde Intercomparison Experiment (JOSIE)—Smit—2007—Journal of Geophysical Research: Atmospheres—Wiley Online Library. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2006JD007308>

The Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Technical Summary. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/technical-summary/>

World Meteorological Organization. (s. f.). Global Atmosphere Watch Station Information System (GAWSIS). GAWSiS. Station Information System. Recuperado 17 de mayo de 2024, de <https://gawsis.meteoswiss.ch/GAWSIS/index.html#/search/station/stationReportDetails/0-20008-0-MAD>