



**FACULTAD DE FARMACIA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE**

TRABAJO FIN DE GRADO

**TÍTULO: LA “BOINA” DE MADRID.
DESCRIPCIÓN, ORIGEN Y EFECTOS SOBRE
LA SALUD**

Autor: Gustavo Pérez Amo

Fecha: Julio 2020

Tutor: Jesús Román Zaragoza

1 Resumen

La contaminación atmosférica es un problema de salud pública cada vez más preocupante. Año tras año salen a la luz nuevos datos que nos informan de lo perjudicial que es para la salud humana, fauna y flora de nuestro planeta. Tras haberse estudiado los posibles responsables de dicha contaminación no cabe duda de que es la actividad humana la principal causa de este mal.

Lamentablemente, no es necesario que los niveles contaminación atmosférica superen los límites preestablecidos por la legislación para causar problemas, ya que pueden ser dañinos en concentraciones consideradas aceptables. De hecho, cuando la situación atmosférica es estable durante unos pocos días, generalmente en verano, desde la periferia de las ciudades medianamente grandes como Madrid se puede observar claramente una masa de aire marrón-amarillenta sobre la metrópoli, aunque no superen los valores de alerta. Esto es un fenómeno conocido como smog fotoquímico. Lo componen varios contaminantes, pero principalmente NO₂, O₃ y compuestos orgánicos volátiles (COVs).

Estos gases son perjudiciales para la salud, en particular para personas con patologías respiratorias y cardiovasculares previas. La mejor estrategia de la que disponemos frente a estos gases es la prevención pues, si conseguimos la reducción de su emisión mediante políticas y buenas prácticas los niveles medios anuales irán decreciendo y con ellos sus efectos adversos.

2 Objetivos

Con la elaboración de este trabajo se pretende resolver una serie de cuestiones acerca de la conocida como *boina* de Madrid.

En primer lugar, definir qué es exactamente la *boina*. Los fenómenos más parecidos y relevantes de los que se tiene constancia en la historia son los episodios de alta contaminación que se describieron por primera vez en Los Ángeles en el 1944 o la llamada “niebla asesina” Londres de 1952, donde fallecieron 4000 personas (1). Estos dos son muy significativos, pero no los únicos, pues se han observado más veces a lo largo de la historia, incluso en la actualidad. Se pretende indagar en las características de estos fenómenos para poder discernir si alguno de estos fenómenos puede explicar la nube, aparentemente de contaminación, visible a pocos kilómetros sobre la ciudad de Madrid.

El segundo objetivo que se pretende abordar es el origen de los contaminantes atmosféricos presentes en esta ciudad y las reacciones químicas que tienen lugar entre ellos. Entendiendo bien el proceso, se podrán tomar medidas de prevención, se podrán realizar modelos que permitan una previsión del aumento de los contaminantes y se podrá atacar los puntos clave del proceso para la reducción al máximo de los contaminantes involucrados.

El tercer objetivo es el análisis de los efectos sobre la salud que tiene la mencionada *boina* en las personas, intentando profundizar un poco más en la población de Madrid.

3 Resultados y Discusión

3.1 ¿Qué es la *boina* de Madrid?

Popularmente se conoce como boina de Madrid a la imagen que se aprecia desde la periferia de la ciudad donde se diferencia claramente una capa de color marrón-amarillenta situada en la capa más baja de la atmosfera y que se extiende a lo largo de todo el área metropolitana. Se aprecia acusadamente tras periodos relativamente largos (varios días) de estabilidad atmosférica e inversión térmica.



Imagen 1: Foto de la ciudad de Madrid (2)

Como se comentó antes, los únicos fenómenos atmosféricos que presentan características similares conocidos son los llamados *smog* (que es una fusión de las palabras inglesas *smoke* y *fog*). Ambos procesos son causados por un alto nivel de contaminación pero, ¿qué es la contaminación atmosférica?

No es fácil definirla, pero podríamos decir que la contaminación es la presencia en la atmósfera de contaminantes. Estos contaminantes a su vez los podemos definirlos como sustancias que normalmente no están presentes en la atmosfera o que sí están, pero su concentración es inusualmente elevada y que puede causar a corto o largo plazo efectos negativos (3).

Por ejemplo, el metano, en condiciones normales sí existe en la atmósfera pues es un residuo del metabolismo de los animales, pero se convierte en contaminante cuando la actividad humana, en este caso, la agricultura eleva los niveles muy por encima de lo normal, absorbiendo más radiación infrarroja de lo normal, aumentando la temperatura atmosférica y afectando a la fauna y flora del planeta. Existe un efecto negativo (aumento de la temperatura) y un aumento extraordinario de los niveles de una sustancia (el metano).

Aunque tengamos en cuenta principalmente los fenómenos de Los Ángeles y Londres, es necesario volver a remarcar que no han sido los únicos. Tanto estos fenómenos como los posteriores con características similares se han estudiado hasta encontrar que, en ambos, los niveles de determinados contaminantes eran muy altos, pero no eran exactamente idénticos el ambas ciudades. El que se produjo en la ciudad estadounidense se le conoce en la actualidad como *smog o contaminación fotoquímicos*, y al de la ciudad inglesa como *smog sulfuroso* (1). Más adelante estudiaremos las diferencias entre ambos, pero, a continuación, nos centraremos en las similitudes.

3.1.1 Aspectos en común entre Los Ángeles 1944 y Londres 1952

En ambos tipos de nieblas de contaminación, es necesario que se dé una inversión térmica en capas bajas de la atmósfera (4). Lo normal es que a medida que se sube en altura por la troposfera, la temperatura disminuya. Si esto no ocurre, se da la llamada inversión térmica. No necesariamente aparece solo en grandes ciudades, pues puede tener lugar por dos motivos principalmente:

- **Irradiación:** Por el día, la tierra se calienta muy rápido (calentando el aire que está más bajo) y por la noche se enfría también muy rápido, incluso más rápido que el aire, de forma que en las capas más cercanas al suelo se forma una sábana de aire frío, y por encima de éste, una capa de aire caliente (a la que aún no le ha dado tiempo a enfriarse).

- **Subsidencia:** El aire seco de capas superiores baja, aumentando con ello presión y temperatura hasta que choca con una capa de aire más frío y húmedo. Justo en ese punto donde ambas masas de aire chocan, se crea la llamada capa de inversión.



Imagen 2. Inversión térmica por subsidencia (5)

Esta inversión térmica evita que el aire ascienda, pues el aire frío es más denso y se queda debajo. Si no se corrige pronto esta situación a lo largo del día, es un factor predisponente a la acumulación de contaminantes, pues bloquea el flujo ascendente de aire (5).

Por otro lado, en ambos fenómenos son necesarios altos niveles de contaminación, aunque la diferencia entre ambos radica en la naturaleza de los contaminantes, que es el objeto del siguiente punto.

3.1.2 Smog sulfuroso

El smog sulfuroso es aquel que se describió en la ciudad de Londres en 1952, aunque fue común durante todo el siglo XX (incluso antes), puesto que la madera estaba siendo reemplazada por el carbón como fuente de energía (1). Una de las características del carbón es su alto contenido en azufre, que en la combustión produce altos niveles de óxidos de azufre y la formación de partículas, que llevaron a tener una visibilidad máxima al medio día de 22 metros. Era típico de grandes ciudades muy industrializadas, con clima húmedo y cerca de focos de contaminación de óxidos de azufre. (6)

En principio, la industria actualmente en Madrid está alejada de la metrópoli (7), por lo que sería complicado que aumentaran mucho los niveles de SO_x .

Para estudiar si los niveles de SO_2 en la ciudad son elevados, nos fijaremos en el número de superaciones de los límites legales de SO_2 atmosféricos. Si se superan, los consideramos elevados y si no, los consideramos normales. Estos niveles los han establecido por normativa europea (8).

Los datos que nos proporciona el ayuntamiento de Madrid nos indican que en el periodo 2010-2019, ninguna estación superó los niveles horarios y diarios de dióxido de azufre, pudiendo descartar que el contaminante principal sea el SO_2 .

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Nº estaciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Número de estaciones de la red de vigilancia que superaron el valor límite horario de SO_2 de $350 \mu g/m^3$ (en más de 24 veces) entre los meses de enero-diciembre. (9)

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Nº estaciones	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Número de estaciones de la red de vigilancia que superaron el valor límite diario de SO₂ de 125 µg/m³ (en más de 3 veces) entre los meses de enero-diciembre. (9)

3.1.3 Smog fotoquímico o Contaminación Fotoquímica

Este tipo de smog es mucho más frecuente en la actualidad que el sulfuroso, en especial, en las grandes ciudades. La composición es bien distinta, pues aquí nos encontramos una mezcla de ozono (O₃), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (como los compuestos orgánicos volátiles), etc. (1)

Por lo que se puede apreciar con los datos del ayuntamiento, estos contaminantes sí podemos considerar que están en grandes concentraciones en la ciudad ya que superan varias veces por año los límites establecidos:

NO_x:

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Nº estaciones	18	15	10	8	6	13	9	15	7	2

Número de estaciones de la red de vigilancia que superaron 40 µg/m³ de NO₂ de media entre 1 de enero y el 31 de diciembre. (9)

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Nº estaciones	6	9	3	3	5	8	4	7	2	1

Número de estaciones de la red de vigilancia que superaron 200 µg/m³ de NO₂ (en más de 18 veces) en una hora entre 1 de enero y el 31 de diciembre. (9)

O₃:

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Nº estaciones	3	5	0	8	7	12	7	6	6	6

Número de estaciones de la red de vigilancia que superaron 120 µg/m³ de O₃ (en más de 25 veces) de media octohoraria entre el 1 de enero y el 31 de diciembre. (9)

Además, Madrid cumple con otros requisitos para que se dé lugar a este tipo de smog. El primero es el clima, pues unas altas temperaturas y un ambiente seco favorecen con creces su formación. En los meses de verano, la situación se agrava. (10)

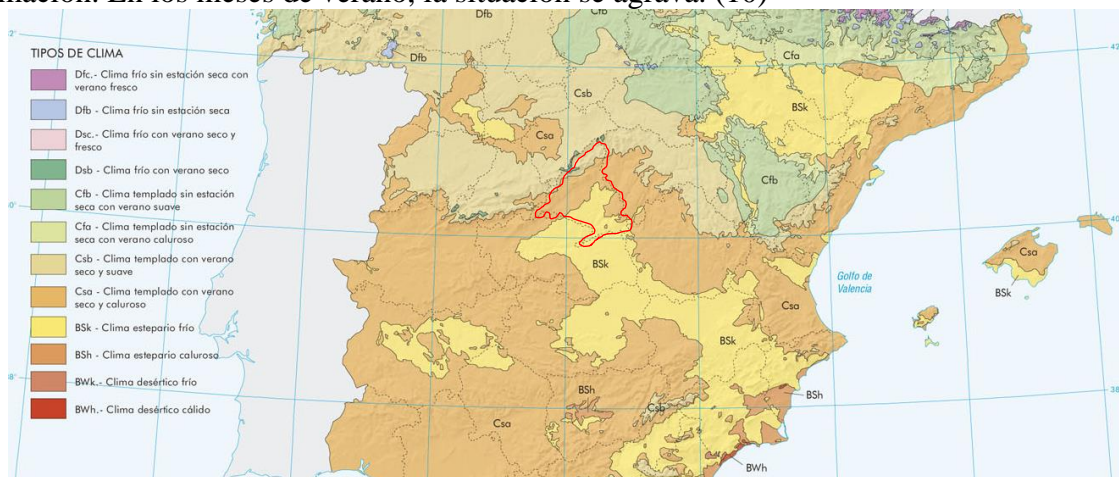


Imagen 3. Clasificación climática según Köppen-Geiger.

Analizando los contaminantes atmosféricos en Mayor proporción de la ciudad, temperatura, humedad y la inversión térmica que se da en las ciudades, podemos estar convencidos de que estamos ante un fenómeno de contaminación fotoquímica.

3.2 Origen y química de los contaminantes

3.2.1 Aspectos generales

Para comenzar, será necesario diferenciar entre dos tipos de contaminantes: los primarios y los secundarios. (11)

- Primarios: Son emitidos directamente a la atmósfera desde la fuente de origen, que puede ser natural (ej.: volcanes), o antropogénica (ej.: combustión en coches).
- Secundarios: Son aquellos que se forman en la atmósfera a través de procesos químicos y fotoquímicos que sufren los contaminantes primarios. No por ello son menos dañinos.

Los contaminantes más relevantes para la formación del smog fotoquímico los podemos separar en tres grandes grupos, aunque hay otros contaminantes que también pueden participar en su formación:

NO_x: Óxidos de nitrógeno, incluyendo el monóxido y el dióxido de nitrógeno (NO y NO₂). Son contaminantes primarios, aunque el NO₂ se puede considerar también secundario. Principalmente, se emiten en forma de NO, aunque una pequeña parte se emite en forma de NO₂. El NO, se oxida dando lugar al NO₂ rápidamente, por lo que se tiende a analizarlos de forma conjunta. Su principal fuente de emisión es el tráfico rodado, que supone un 39% de las emisiones totales. Se forma con la combustión interna del motor, que alcanza grandes presiones y temperaturas y, al utilizar el aire como fuente de oxígeno, también se introduce una gran parte de nitrógeno molecular (N₂), oxidándose y dando lugar a estos óxidos. (12)

O₃: Ozono. Siempre que hablemos de esta molécula como contaminante, nos estaremos refiriendo al ozono troposférico, pues existe también el ozono estratosférico (capa de ozono) que no solo no es dañino, sino que nos protege de los rayos ultravioletas procedentes del sol. Es un contaminante secundario, por lo que se forma a partir de otros contaminantes, en particular de reacciones entre NO_x y COVs. Las reacciones que dan lugar a este contaminante, las veremos un poco más adelante. (12)

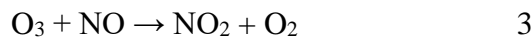
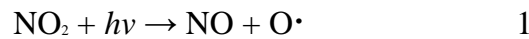
COVs: Es la abreviatura de compuestos orgánicos volátiles. También se pueden encontrar con las siglas en inglés como VOCs. Son sustancias químicas orgánicas que su composición permite que se evaporen a temperatura ambiente (14). Algunos ejemplos serían el benceno, el xileno, el propano o el butano. En la literatura nos podemos encontrar los NMVOCs, que son todos los compuestos volátiles menos el metano (CH₄). Se hace esta separación pues la principal fuente del metano es la agricultura, mientras que en el resto es producido directa o indirectamente en mayoría por la industria y el uso de disolventes orgánicos, por ejemplo, los usados en pinturas y barnices. Pueden ser primarios y secundarios y, aunque su principal fuente de emisión a la atmósfera sea natural (pirenos, isoprenos, etc.), las emisiones humanas han tomado importan-

cia. (13) Algunos COV, como el benceno, el 1,3-butadieno y el cloruro de vinilo están clasificados por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, siglas en inglés) en el Grupo 1 como cancerígenos para los humanos. (14)

3.2.2 Formación y reacciones de los contaminantes en la atmósfera

3.2.2.1 El equilibrio foto estacionario

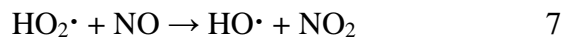
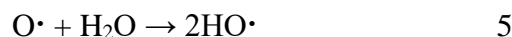
Es difícil entender la producción de O₃ troposférico. Son muchas las reacciones que tienen lugar y muchos compuestos los que intervienen. El primer paso lo dieron Haagen-Smit en el 1952, describiendo los mecanismos fotoquímicos de la formación de ozono. Si bien otros autores han ido avanzando en este ámbito y hoy en día se conoce mucho sobre el tema, aún faltan estudios para dominarlo, pues la complejidad del sistema dificulta su estudio. Siguiendo el mismo recorrido, nuestra primera parada es en la formación de ozono troposférico mediante luz ultravioleta y con ayuda de óxidos de nitrógeno. (15)



En las reacciones 1 y 2 podemos observar como el NO₂ es precursor del ozono troposférico. Si bien estas reacciones son importantes en las grandes ciudades, en especial aquellas con un clima propicio y con alta irradiación solar, no explican el aumento neto de O₃ en la troposfera. La fotólisis del dióxido de nitrógeno produce ozono, que rápidamente reacciona con el monóxido de nitrógeno alcanzando el equilibrio. (15)

3.2.2.2 Incremento neto del Ozono

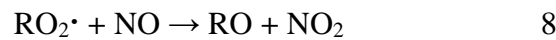
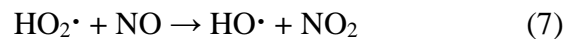
Para explicar ese aumento, aparecen en escena los COVs y el radical hidroxilo. Lo ejemplificamos con el CO:



En la reacción 5, surge por primera vez el radical hidroxilo (HO·) que, como veremos más adelante, será un compuesto clave para la formación del ozono. En la reacción 6, usamos el monóxido de carbono (otro contaminante primario), pero también veremos que no es el único compuesto que reacciona con este radical. (16)

A las especies de O·, O₃ de forma general y al NO₂, en nuestro caso particular, ya que es un precursor en la atmósfera, se les conoce como «*especies reactivas de oxígeno*» u «*oxígeno impar*» («*odd oxygen*» en inglés).

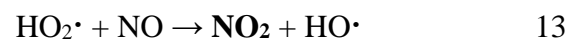
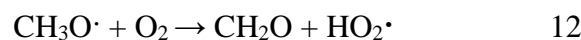
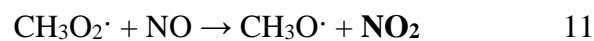
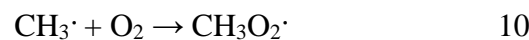
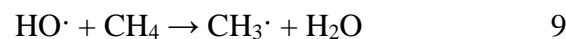
Estas especies reactivas de oxígeno se conservan en las reacciones 1-3, y se forman a través de las reacciones del NO con HO₂• y RO₂•. (16)



Los RO₂• son un grupo complejo de radicales peroxilo donde lo importante es que en su estructura tienen este enlace simple entre oxígenos (O–O) en vez del enlace doble (O=O).

En comparación con el HO•, los RO₂• son mucho menos reactivos, dando solamente reacciones rápidas al juntarse con otros radicales y NO_x. Estas reacciones forman ozono de forma neta, ya que aumentarán los niveles de dióxido de nitrógeno que gracias a la luz ultravioleta formará dicho Ozono (reacción 1). La reacción 8 está en competencia con otras vías, pero si la fracción de RO₂• que reacciona con NO es elevada, la formación de ozono neta también será elevada. (17)

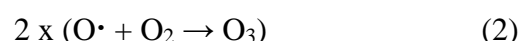
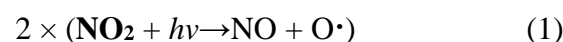
El radical hidroxilo (HO•) reacciona con una gran variedad de compuestos. Muchos de ellos COVs, pero al ser un grupo tan amplio vamos a ver un ejemplo con el metano que, aunque a veces se saca fuera del grupo (NMVOCs) por ser un contaminante proveniente de la agricultura, es el más sencillo y la reactividad es extrapolable (17). Otros autores toman de ejemplo el metanol, que hace unos años pretendía ser un combustible alternativo. (18)



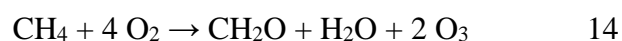
El CH₃O₂• es un ejemplo de estos RO₂• mencionados previamente. La cadena R en este caso es la más sencilla, solo un carbono saturado.

En la reacción 13 vemos como el radical hidroxilo se regenera. Si encontrara otra molécula de hidrocarburo podría darse el caso de volver al inicio del ciclo, generando aún más O₃.

Para acabar, debemos recordar las reacciones 1 y 2 donde el dióxido de nitrógeno forma ozono gracias a la luz solar necesaria para la fotólisis, que en este caso debemos multiplicar por dos pues se han formado dos moléculas de NO₂ (16).



Dejando solo la reacción global nos quedaría:



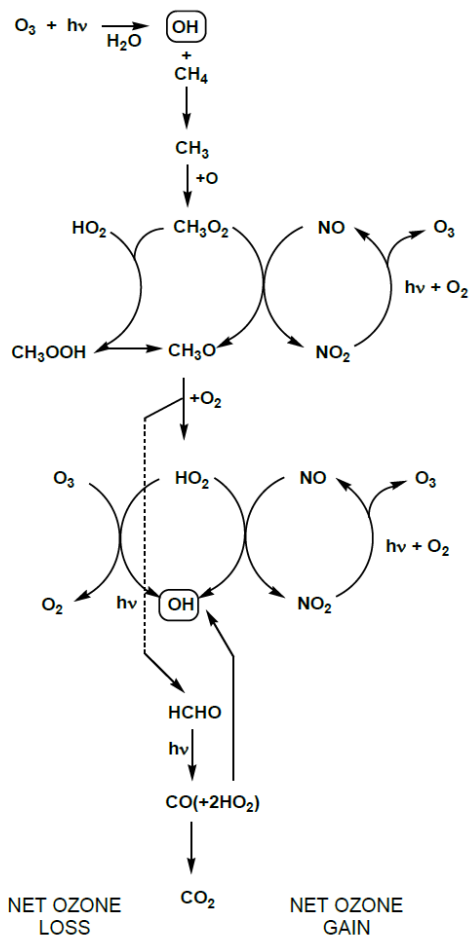
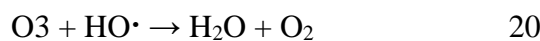
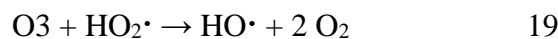


Ilustración 1. Esquema de las reacciones que tienen lugar en la atmósfera. A la izquierda, las que eliminan ozono y a la derecha las que lo forman. (15)

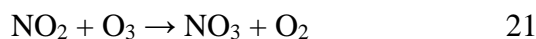


El ozono por su parte tampoco se acumula indefinidamente. Se pierde gracias a su fotólisis o a través de dos reacciones.



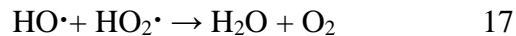
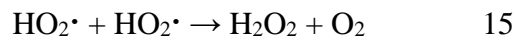
3.2.2.4 Reacciones nocturnas y deposición

Por último, deberemos estudiar qué pasa de noche, pues no hay radiación ultravioleta procedente del sol que pueda formar radicales a partir de NO_2 .

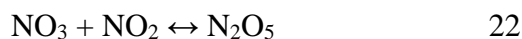


3.2.2.3 Terminación de la cadena

Como se ha visto, el aumento del ozono es gracias al bucle causado por la combinación entre NO_x y compuestos orgánicos, que forman radicales libres y finalmente O_3 . Pero este ciclo tiene pérdidas y vías de terminación, por ejemplo, la salida de los HO_x del ciclo. (19)



Tanto los peróxidos como el ácido nítrico pueden reaccionar con el $\text{HO}\cdot$ o eliminarse por deposición. (19). Se considera la reacción 18 como el paso terminal principal ya que predomina en toda la troposfera. Aun así, los NO_x pueden acumularse en forma de PAN (peroxiacetil nitrato) formando un reservorio.



Estas tres reacciones se deben dar después del atardecer pues, el NO_3 por acción de la luz ultravioleta formaría de nuevo NO_2 . El equilibrio de la reacción 22, tras la caída del sol se ve desplazado hacia la derecha, favoreciéndose la formación del dímero. Éste a su vez, aunque lentamente (17), reacciona con el vapor de agua del ambiente convirtiéndose así ácido nítrico durante la noche y terminará por depositarse saliendo así del ciclo. (16) (17) (18)

3.2.2.5 El ratio COVs/ NO_x

$\frac{\text{COVs}}{\text{NO}_x}$: Este ratio es una relación entre la concentración de compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno. Puede ser elevado, con una concentración alta de COVs y baja de NO_x , típico de las zonas rurales y alejadas de la ciudad o también puede ser bajo, con altas concentraciones de NO_x , típico de las urbes muy contaminadas, como en el caso de Madrid. Dependiendo del caso será más efectivo tomar unas medidas u otras (18).

Ratio reducido: Es nuestro caso, el de Madrid. Las emisiones de NO_x son abundantes, por lo que parece pensar que lo correcto es enfrentarse a las fuentes de dichas emisiones, pero en la práctica no es así. Parece que, en estos casos, reducir las emisiones de NO_x sin disminuir también las de COVs provocan un aumento de ozono. (18) (20). Esto es debido a la competencia entre el NO_2 y los COVs por el $\text{HO}\cdot$, ya que gracias a la reacción 18, el NO_2 formará HNO_3 que acabará depositándose, evitando así la formación de ozono, mientras que los COVs, mediante las reacciones 9-13, forman ozono. Si no hay tanto NO_2 que reaccione con el radical hidroxilo, más compuestos orgánicos reaccionarán con éste y más ozono se generará (18). Este efecto se aprecia algunos fines de semana, que disminuye el tráfico, pero aumenta el ozono. (20)

Ratio elevado: Característico de las zonas rurales. Pasa algo parecido. Para que sea efectivo, se tienen que reducir los niveles de NO_x , no solo los COVs (18).

3.3 Efectos sobre la salud

Queda claro que el ozono troposférico y el NO_2 están relacionados en cuanto a su formación y química en la atmosfera, pero además están estrechamente relacionados en su comportamiento sobre los seres vivos, en particular, los humanos. De todos modos, es importante examinar los resultados que tenemos de los dos contaminantes por separado ya que es necesario evitar confusiones e interferencias entre contaminantes. Esto se agrava aún más con el NO_2 , pues a su vez está altamente ligado con las $\text{PM}_{2.5}$ (partículas de diámetro inferior a 2.5 micras), ya que también se emiten con el transporte rodado. Por ello, solo tomaremos aquellos datos y estudios cuya correlación sea independiente de los niveles de $\text{PM}_{2.5}$.

3.3.1 Daño oxidativo e inflamación

Este efecto es común a ambos contaminantes. Los dos tienen un potencial oxidativo muy elevado. (21) El pulmón dispone de una capa de protección llamada fluido de revestimiento epitelial, que es un líquido compuesto por mucinas, metaloproteína y factores antimicrobianos de la defensa innata. En esta fina capa, hay una alta concentración de antioxidantes como el glutatión o la vitamina E, que actúan como defensa frente a radicales libres (22). Con la llegada del O_3 y del NO_2 , rápidamente los niveles de antioxidantes bajarán, aumentando en consecuencia los de las especies reactivas de oxígeno (ROS) y de nitrógeno (RNS). También aparecen radicales libres como $O_2^{\cdot-}$, GS^{\cdot} y HO^{\cdot} . Todos estos radicales activarán el NF- κ B. (21)

El NF- κ B es un factor transcripcional. Al activarse, viajará al núcleo e inducirá la transcripción de determinados genes. Normalmente se inicia por acción de la IL-1 o del TNF- α , pero también es capaz de activarse si la célula sufre de estrés oxidativo. Realmente no se activa directamente, pues el NF- κ B dispone de una proteína inhibidora llamada I κ B α . Esta proteína impide la traslocación al núcleo del NF- κ B. El estrés oxidativo activa la I κ B kinasa (IKK), que fosforilará I κ B α , permitiendo la traslocación del NF- κ B al núcleo y consecutivamente induciendo los genes específicos. Estos genes darán lugar a:

- Citoquinas: TNF- α , IL-1B e IL-6
- Moléculas de adhesión: ICAM-1
- Enzimas: COX-2 e iNOS

Todas estas moléculas participarán directa o indirectamente en la respuesta inflamatoria. (24)

Parece que este efecto es mayor en el ozono pues su absorción es mayor que la del NO_2 , siendo del 75% en el caso del ozono y del 60% en el caso del dióxido de nitrógeno, aunque estos factores pueden variar entre personas y también dependerán del flujo de aire, ya que, si lo aumentamos, por ejemplo, haciendo ejercicio al aire libre, la absorción se dispara (25) (26)

Otras investigaciones sugieren que el ozono produce H_2O_2 y aldehídos tras el contacto con ácidos grasos insaturados y derivados del ácido araquidónico situados en el fluido de revestimiento epitelial. El H_2O_2 es capaz de dañar el DNA junto con otros radicales. También es capaz de disminuir la capacidad de los tejidos para repararse, prolongando el daño (27).

3.3.2 Sistema inmune. Infecciones.

Como se comentaba, ambas moléculas eran capaces de aumentar los niveles de factores de la inflamación. Uno de ellos es la molécula de adhesión ICAM-1. Esta molécula es una inmunoglobulina cuya función es ser reconocida por los leucocitos tras sufrir un daño para facilitar la extravasación, localizar y agilizar la respuesta al daño. Ciertos virus del género *Rhinovirus* usan esta molécula para identificar las células del endotelio e infectarlas. Suelen provocar enfermedades tipo resfriados (28).

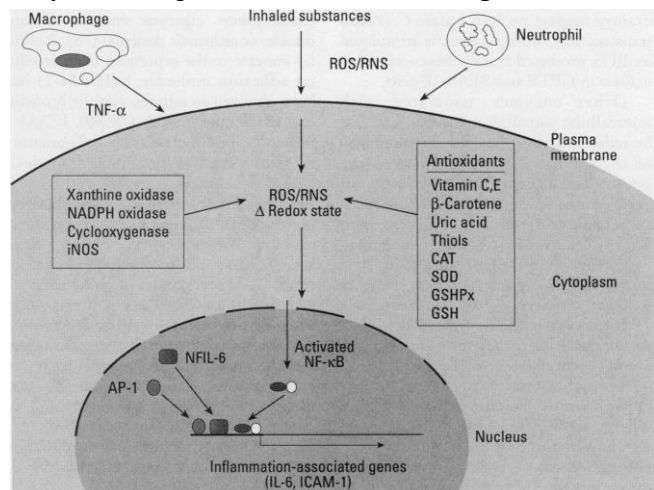


Ilustración 2 NF- κ B activado por ROS y RNS (23)

En situaciones normales existe en el fluido de revestimiento epitelial un equilibrio entre las especies reactivas de oxígeno generadas por el propio organismo y la respuesta inflamatoria. Una de estas fuentes de ROS son los fagocitos que defienden el pulmón de los patógenos. Eso es debido a que uno de los mecanismos del que disponen para destruir bacterias es la *ráfaga respiratoria*, que no es más que una rápida liberación dentro del fagosoma de ROS que producirán daños irreversibles en la bacteria causando su muerte (22). El ozono, aunque es capaz de crear ROS, no actúa favoreciendo este mecanismo si no que lo enfrenta. La exposición a ozono disminuye la capacidad de los macrófagos alveolares de fabricar el anión superóxido $O_2^{\cdot-}$, disminuyendo su capacidad bactericida (29).

Con todo ello, aunque son capaces de facilitar las infecciones pulmonares, pocos estudios existen que relacionen estos dos contaminantes con infecciones respiratorias puesto que es muy difícil el estudio de esta correlación, pues se necesitan poblaciones muy grandes y estables. En el caso del nitrógeno, sí existe relación entre los ingresos por infecciones respiratorias, bronquiolitis y otitis media con elevados niveles del contaminante, pero solo en menores de cinco años (30).

3.3.3 Sensibilidad a alérgenos, asma y enfermedad pulmonar obstructiva crónica

La información de la que disponemos nos deja clara la sensibilización que producen ambos contaminantes hacia los alérgenos capaces de producir reacción alérgica en personas con rinitis alérgica y broncoconstricción en asmáticos (31).

Con una exposición al ozono elevada y tras tres horas de ejercicio intermitente se consiguieron resultados positivos en la relación entre los niveles de dicho gas y la sensibilización, en particular, en asmáticos (32).

En cuanto al NO₂, la relación es más clara. Por un lado, tanto las consultas como los síntomas de broncoconstricción en niños aumentan con la exposición a dicho gas (32). Por otro lado, las personas que sufren un ataque de asma o exacerbaciones de la bronquitis crónica en los días con altos niveles de NO₂ tienen más probabilidades de fallecer. Además, un metaanálisis de estudios sobre seis ciudades, una de ellas, Barcelona, concluye que los ingresos en hospitales por bronquitis los días de mayor contaminación por NO₂ aumentan un 2% por cada 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (30)

Por último, la incidencia de asma aumenta a la par que lo hacen los niveles de NO₂. Los datos que obtenemos son de un aumento del riesgo del 15% de padecer asma por cada aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (30)

3.3.4 Enfermedades cardiovasculares

Las implicaciones del ozono en este aspecto aún están por investigar. Con relevancia encontramos que es capaz de disminuir la variabilidad de frecuencia cardiaca un 11.5% por cada incremento de 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo más grave si las personas sufrían con anterioridad de hipertensión o cardiopatía isquémica. Esta disminución aumenta el riesgo de padecer cardiopatía (26).

Un estudio italiano (33), encontró un aumento de mortalidad por enfermedad cardiaca del 2.63% con el aumento de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de NO₂, aportando susceptibilidad a personas con factores de riesgo como insuficiencia, trastornos de la conductividad eléctrica o diabetes. Más datos

coinciden con dicho estudio, pues en los días de altos niveles de NO₂ se reportó además un aumento del uso de desfibriladores en la ciudad de Massachusetts. También la mortalidad de pacientes con insuficiencia cardíaca es mayor en días con elevados niveles de NO₂ (30).

3.3.5 Aumento de la mortalidad

Como en el resto de los casos, es difícil discernir entre los efectos causados por el contaminante estudiado y no con otros. Aun así, existen metaanálisis en los que se observa una clara correlación entre los niveles de ozono y el aumento de la mortalidad. Para sufrir este aumento no son necesarias concentraciones muy elevadas, pues es notoria a partir de 50-60 µg/m³ de media en una hora. Pero eso no es todo pues se piensa que se puede estar infravalorando las cifras porque un estudio en 48 ciudades estadounidenses tomó como referencia no solo el día de después a un aumento de la concentración de ozono si no que estudió los tres días posteriores, aumentando la estimación a un aumento de la mortalidad del 0.5% por cada aumento 10 µg/m³ (si solo estudiamos el día posterior, el aumento es del 0.3%) (26)

El NO₂ muestra unos datos muy parecidos. En un estudio de 30 ciudades europeas el aumento de la mortalidad es del 0.3% por cada aumento de 10 µg/m³ de este contaminante, pero sabemos que existen poblaciones más susceptibles a este contaminante, como aquellas personas que sufren de cardiopatía isquémica, desórdenes de la conductividad eléctrica cardíaca, deterioro de la circulación pulmonar o diabetes, entre otras. (26)

3.3.6 Muertes prematuras atribuibles

Las muertes prematuras son aquellas muertes ocurren antes de alcanzar la edad esperada para la edad de dicha persona. Si la causa se puede eliminar, se considera evitable. En Europa, se calcula que las muertes atribuibles al NO₂ son de 71 000 y al O₃ de 15 100 aproximadamente. Estos datos son anuales.

Según los datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente, en territorio nacional, estas muertes prematuras anuales son de 7 700 y 1 500 para el NO₂ y O₃ respectivamente. (34)

3.3.6.1 Madrid, Comunidad y España

Hace tiempo que se puso de manifiesto la similitud entre la dinámica de la ciudad de Madrid con el resto de grandes ciudades, pero en el caso del ozono, no solo se encontró relación entre la mortalidad y este contaminante si no que los datos del aumento de mortalidad debido a enfermedades cardiovasculares eran comparables los estudiados en Los Ángeles y Barcelona. (35)

Aun así, no debemos solo preocuparnos de la ciudad de Madrid. Los contaminantes no son inmóviles. El viento y las propiedades geográficas de la zona contribuyen al estancamiento o propagación de los gases a los alrededores de la ciudad, por lo que, aunque la mayor fuente de emisión este en el centro de Madrid, el efecto puede manifestarse en los alrededores. Separando la comunidad en dos zonas, siendo una el centro, y la otra, la periferia encontramos datos

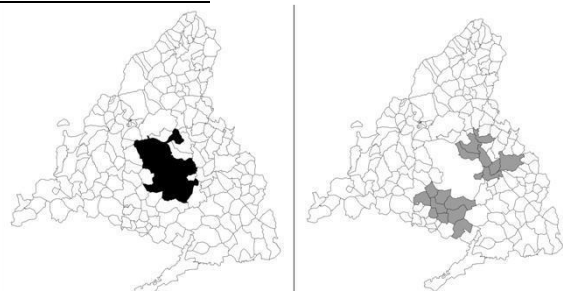


Ilustración 3. En Negro, la zona 1, en gris, la zona 2

muy valiosos. Efectivamente, el ozono aumenta la mortalidad en nuestra población, pero no homogéneamente por zonas.

	Zona 1	Zona 2
RR para todas las causas de muerte	1.014 (95% CI 1.005, 1.022)	Sin asociación encontrada
RR para las enfermedades cardiovasculares	1.023 (95% CI 1.008, 1.039)	1.024 (95% CI 1.004, 1.046)
RR para las enfermedades respiratorias	1.032 (95% CI 1.007, 1.057)	1.084 (95% CI 1.007, 1.157)*

* Solo en personas mayores de 64 años

Si bien la mortalidad es mayor en la zona dos, también lo es la concentración de contaminantes pues, desde que se emite el NO hasta que se alcanza la irradiación máxima solar pasan unas horas en donde el contaminante puede viajar a las zonas suburbanas transformándose ahí en ozono. Además, hay que tener en cuenta la diferencia entre las poblaciones, pues ambas no son iguales demográficamente. (36)

En la comunidad de Madrid, durante los años 2000-2009, las muertes atribuibles al ozono troposférico fueron de 7 680. No disponemos de datos de dióxido de nitrógeno pues los resultados del estudio solo muestran datos donde la asociación ha sido significativa ($p < 0.05$). A pesar de ello, si podemos concluir con que Madrid fue, dentro de las ciudades estudiadas, la metrópoli con mayor media anual de NO₂ (59.4 µg/m³) durante ese periodo. En cuanto al ozono, Cáceres lideraría la media anual (89.8 µg/m³). En este estudio comparan los datos de la mortalidad anual de la OMS y del estudio propio, habiendo diferencias cuya causa puede radicar en que la OMS basa su estudio también en la mortalidad a largo plazo, no solo a corto plazo (37) (38).

4 Conclusiones

La conocida como boina de Madrid es un fenómeno de contaminación atmosférico causado por la actividad humana en la cual las concentraciones de NO_x, O₃ y compuestos orgánicos volátiles (COVS) se elevan por encima de las concentraciones esperadas, reaccionando entre ellos y produciendo ese color característico visible desde la periferia. Es necesario que la situación meteorológica sea favorable (inversión térmica, alta irradiación solar y ausencia de viento y lluvias). Corresponde al smog fotoquímico.

En la ciudad de Madrid, como en muchas otras grandes ciudades, el ratio COVs/NO_x es bajo, pues las emisiones de NO_x debidas al tráfico son muy elevadas. Aun así, no se puede simplemente disminuir las emisiones de NO_x porque, paradójicamente aumentan los niveles de ozono. Esto es debido a que el NO₂ y los COVs compiten por radical hidroxilo. El NO₂ dará lugar al ácido nítrico y con ello a la deposición y salida del ciclo. Los COVs, por el contrario, a la formación de NO₂ y con ello a la de ozono. Por ello, hay que disminuir conjuntamente la emisión de ambos contaminantes.

El interés por disminuir el smog nace, principalmente, de sus efectos negativos sobre la salud. Dichos efectos adversos son causados por los altos niveles de contaminantes que, por separado, afectan negativamente al ser humano:

- Las propiedades oxidantes del NO₂ y O₃ provocan a nivel del pulmón la aparición radicales libres, que activarán a su vez el factor de transcripción NF-κB. Este uno de los responsables de la respuesta inflamatoria del cuerpo humano.
- Aumentan la susceptibilidad a patógenos.

- Aumentan la sensibilidad a alérgenos, principalmente en asmáticos.
- Aumentan el riesgo de desarrollar asma y disminuye la probabilidad de sobrevivir ante una exacerbación del asma o del EPOC.
- Aumento de la mortalidad de todas las causas y en particular, de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

En Madrid, los efectos dañinos también se aprecian, pero no debe considerarse únicamente la ciudad pues, la dinámica de la atmósfera puede transportar los contaminantes lejos del punto de emisión, pero provocando los mismos daños.

Estos daños pueden ser peores en poblaciones de riesgo. En cuanto a las enfermedades respiratorias destacan los asmáticos (niños en particular) y pacientes de EPOC. En el caso de las enfermedades cardiovasculares presentan mayor riesgo aquellos que padecen de patologías cardiovasculares previas y diabetes.

5 Referencias

1. Figueruelo Alejano J, Marino Dávila M. Química física del medio ambiente y de los procesos medioambientales. Barcelona: Reverté; 2004.
2. Así es el aire que respiras: la boina de contaminación que cubre Madrid [Internet]. Vozpópuli. 2017 [Consultado el 19 mayo 2020]. Disponible en: https://www.vozpopuli.com/espana/madrid/respiras-boina-contaminacion-cubre-Madrid_3_1083521639.html#slide1
3. Daly A, Zannetti P. An Introduction to Air Pollution – Definitions, Classifications, and History [Internet]. Fremont; 2007 [Consultado el 10 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.nile-center.com/uploads/RQZG7BCW4DGXNSZ.pdf>
4. Vallero D. Fundamentals of air pollution. 5th ed. 2014.
5. Inversión térmica [Internet]. AEMET. 2020 [Consultado el 26 mayo 2020]. Disponible en: https://meteoglosario.aemet.es/es/termino/1043_inversion-termica
6. Agencia Europea del Medio Ambiente. EN09 Emissions (CO₂, SO₂ and NO_x) from public electricity and heat production - explanatory indicators. 2008.
7. OBSERVATORIO INDUSTRIAL DE MADRID. Nuevo Mapa Sectorial de la Industria. Madrid;.
8. DIRECTIVA (UE) 2015/1480 DE LA COMISIÓN. Diario Oficial de la Unión Europea; 2015.
9. Ayuntamiento de Madrid. Resumen de calidad del aire (Periodo del 1 de enero al 31 de diciembre de 2019). Madrid: Dirección General de Sostenibilidad y Control Ambiental; 2020.

10. Martí Ezpeleta A, Cuadrat Prats J, Marzol Jaén M. Atlas Nacional de España [Internet]. Instituto Geográfico Nacional. 2020 [Consultado el 5 June 2020]. Disponible en: <http://atlasnacional.ign.es/wane/Clima>
11. Glossary: Primary & Secondary pollutant [Internet]. Ec.europa.eu. 2020 [Consultado el 4 mayo 2020]. Disponible en: https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/opinions_layman/en/indoor-air-pollution/glossary/pqrs/primary-pollutant-secondary-pollutant.htm#:~:text=A%20primary%20pollutant%20is%20an,pollutants%20react%20in%20the%20atmosphere.
12. Agencia Europea del Medio Ambiente. Air quality in Europe 2017 report. 2018.
13. VOC Definition [Internet]. A. 2020 [Consultado el 4 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality/resources/glossary/voc>
14. Technical Overview of Volatile Organic Compounds | US EPA [Internet]. US EPA. [cited 9 April 2020]. Available from: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/technical-overview-volatile-organic-compounds#4>
15. Monks P, Archibald A, Colette A, Cooper O, Coyle M, Derwent R et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2015;15(15):8889-8973.
16. V.A. Mohnen C. Tropospheric Chemistry. Atmospheric ozone 1985 [Internet]. 1985 [Consultado el 31 abril 2020];Volumen I:117-150. Disponible en: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=6111
17. Lightfoot P, Cox R, Crowley J, Destriau M, Hayman G, Jenkin M et al. Organic peroxy radicals: Kinetics, spectroscopy and tropospheric chemistry. *Atmospheric Environment Part A General Topics*. 1992;26(10):1805-1961.
18. Finlayson-Pitts B, Pitts J. Atmospheric Chemistry of Tropospheric Ozone Formation: Scientific and Regulatory Implications. *Air & Waste*. 1993;43(8):1091-1100.
19. Jacob D. Heterogeneous chemistry and tropospheric ozone. *Atmospheric Environment*. 2000;34(12-14):2131-2159.
20. Brönnimann S, Neu U. Weekend-weekday differences of near-surface ozone concentrations in Switzerland for different meteorological conditions. *Atmospheric Environment*. 1997;31(8):1127-1135.
21. Nichols B. Effects of Ozone Exposure on Nuclear Factor-kappaB Activation and Tumor Necrosis Factor-alpha Expression in Human Nasal Epithelial Cells. *Toxicological Sciences*. 2001;60(2):356-362.
22. van der Vliet A. Antioxidant Defenses in the Lung. *Comparative Biology of the Normal Lung*. 2015;:489-507.
23. Martin L, Krunkosky T, Voynow J, Adler K. The role of reactive oxygen and nitrogen species in airway epithelial gene expression. *Environmental Health Perspectives*. 1998;106(suppl 5):1197-1203.

24. Liu T, Zhang L, Joo D, Sun S. NF- κ B signaling in inflammation. *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2017;2(1).
25. Molecular mechanisms of nitrogen dioxide induced epithelial injury in the lung. *Molecular and Cellular Biochemistry* [Internet]. 2002 [Consultado el 15 mayo 2020];(234/235):71–80. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12162462/>
26. World Health Organization Regional Office for Europe., Amann M. Health Risks of Ozone from Long-range Transboundary Air Pollution. 2008.
27. Gabrielson E, Yu X, Spannhake E. Comparison of the toxic effects of hydrogen peroxide and ozone on cultured human bronchial epithelial cells. *Environmental Health Perspectives*. 1994;102(11):972-974.
28. Bella J, Kolatkar P, Marlor C, Greve J, Rossmann M. The structure of the two amino-terminal domains of human ICAM-1 suggests how it functions as a rhinovirus receptor and as an LFA-1 integrin ligand. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 1998;95(8):4140-4145.
29. Ryer-Powder J, Amoruso M, Czerniecki B, Witz G, Goldstein B. Inhalation of Ozone Produces a Decrease in Superoxide Anion Radical Production in Mouse Alveolar Macrophages. *American Review of Respiratory Disease*. 1988;138(5):1129-1133.
30. Ackermann-Liebrich U, Felber Dietrich D, Joss M. Respiratory and Cardiovascular Effects of NO₂. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. 2019;.
31. World Health Organization. Air Quality Guidelines Global update 2005. Geneva: World Health Organization; 2006.
32. Jörres R, Nowak D, Magnussen H. The effect of ozone exposure on allergen responsiveness in subjects with asthma or rhinitis. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*. 1996;153(1):56-64.
33. Chiusolo M, Cadum E, Stafoggia M, Galassi C, Berti G, Faustini A et al. Short-Term Effects of Nitrogen Dioxide on Mortality and Susceptibility Factors in 10 Italian Cities: The EpiAir Study. *Environmental Health Perspectives*. 2011;119(9):1233-1238.
34. Agencia Europea del Medio Ambiente. Air quality in Europe 2019 report. 2020.
35. Díaz J, García R, Ribera P, Alberdi J, Hernández E, Pajares M et al. Modeling of air pollution and its relationship with mortality and morbidity in Madrid, Spain. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 1999;72(6):366-376.
36. López E, Salvador P, Artiñano B, García S, Fernández R, Posada M. Short-Term Effects of Ozone on Mortality: Comparative Analysis of Urban and Suburban Zones in Madrid (Spain). *J of Health Science*. 2018;6(3).
37. Díaz J, Ortiz C, Falcón I, Salvador C, Linares C. Short-term effect of tropospheric ozone on daily mortality in Spain. *Atmospheric Environment*. 2018;187:107-116.

38. Linares C, Falcón I, Ortiz C, Díaz J. An approach estimating the short-term effect of NO₂ on daily mortality in Spanish cities. *Environment International*. 2018;116:18-28.