Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

FACULTAD DE FARMACIA

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE

TRABAJO FIN DE GRADO

El papel de los óxidos de nitrógeno en el Cambio Climático. Efectos sobre la salud.

Autor: Laura Fernández Rivas.

Tutor: Jesús Román Zaragoza.

Convocatoria: 30 de junio del 2015.

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Resumen.

El Cambio Climático es una variación en el estado del clima, cuya causa principal es el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera derivado de las elevadas emisiones antropogénicas de los mismos, que provocan un calentamiento global. Consecuentemente se producen fenómenos meteorológicos extremos, los cuales afectan, entre otras cosas, a la distribución y concentración atmosférica de distintos contaminantes. Uno de estos contaminantes son los óxidos de nitrógeno (NO_x), una familia de compuestos integrada por diferentes gases, entre ellos óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), trióxido de dinitrógeno (N_2O_3), tetraóxido de dinitrógeno (N_2O_4) y pentaóxido de dinitrógeno (N_2O_5). Estos gases son emitidos desde fuentes naturales, como la actividad microbiana en suelos, tormentas eléctricas o incendios forestales, y mayormente desde fuentes antropogénicas, siendo la combustión de los motores diésel su principal origen.

A nivel troposférico, estos óxidos experimentan gran cantidad de reacciones químicas, dando lugar a otros compuestos como peroxiacilnitratos y ácido nítrico. Todas estas reacciones van a depender principalmente de la concentración de NO_x presente en la atmósfera y de la temperatura e intensidad de la radiación solar, pudiendo diferenciar entre la química nocturna y diurna de estos compuestos: por el día tiene lugar el "ciclo de los óxidos de nitrógeno", desencadenado por fotólisis y cuyo resultado final es la formación de ozono troposférico, mientras que durante la noche el NO_2 evoluciona a través de procesos oxidativos y forma finalmente ácido nítrico uniéndose al agua presente en la atmósfera en forma de vapor.

El óxido nitroso (N_2O) es otro componente de este grupo de óxidos. En este caso se trata de un GEI que se encuentra en la atmósfera como parte del ciclo biogeoquímico del nitrógeno, pero que se ha transformado en un importante cómplice del Cambio Climático debido al aumento de sus emisiones antropogénicas. Gracias a su forzamiento radiativo (0.17 $\pm$ 0.03 Wm^{-2}) y al hecho de contribuir en la deplección de ozono troposférico es el tercer GEI en improtancia, por detrás de dióxido de carbono y metano.

El ozono troposférico y la lluvia ácida son dos consecuencias derivadas de la actividad atmosférica de los NO_x que también intervienen en el Cambio Climático. El primero surge de la química diurna y se trata un GEI con forzamiento radiativo mayor que el N_2O pero vida media menor, que también tiene efectos sobre la salud humana (forma parte del smog fotoquímico) y sobre la vegetación, principal sumidero de CO_2. La lluvia ácida surge de los

procesos de deposición de los NO_x e interviene en el Cambio Climático a través de la destrucción de la vegetación y la eutrofización de lagos y océanos.

Por otro lado, los NO_x son sustancias irritantes y corrosivas que van a afectar a la salud humana, a través de su inhalación principalmente. La exposición a estas sustancias provoca enfermedades respiratorias (disminución de la función respiratoria, asma, bronquitis, cáncer de pulmón), cardiovasculares (cardiomegalia, colapso circulatorio) e irritaciones oculares y de la piel, pudiendo llegar a causar incluso defunciones prematuras. Todo esto hace que los NO_x, junto con el resto de contaminantes atmosféricos, supongan un importante problema de Salud Pública, al que la totalidad de la población está expuesta. No obstante, no todos los grupos de población se ven igual de afectados, ya que los niños, las embarazadas, los ancianos, los individuos con enfermedades concomitantes o con menos recursos son los más vulnerables a las consecuencias de la contaminación.

Introducción y antecedentes.

Según el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), el término Cambio Climático se refiere a la variación en el estado del clima que puede identificarse de forma estadística mediante fluctuaciones en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, persistiendo por periodos de tiempo prolongados, normalmente décadas o períodos mayores. Puede deberse a procesos naturales internos o variaciones del forzamiento externo, como modificaciones en el ciclo solar y erupciones volcánicas o cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o el uso del suelo[1].

En la actualidad el Cambio Climático es un hecho[2] en el cual la actividad humana es considerada causa capital, pues el aumento del nivel del mar, la disminución de la cantidad de hielo y nieve o el calentamiento atmosférico y de la superficie terrestre no se habían observado desde hace milenios[3]. Dentro de dicha actividad, las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) constituyen el principal desencadenante, ya que en la actualidad son de las más elevadas que se hayan registrado[3]. En general, los GEI contribuyen al balance energético de la Tierra impidiendo que la radiación infrarroja que ésta desprende tras calentarse se disipe (efecto invernadero) y permitiendo una temperatura apta para la vida[2]. El elevado aumento de GEI en la atmósfera ha hecho que su contribución a dicho balance sea excesiva, lo que da lugar al calentamiento global[3]. El grado en que estos gases afectan al comentado calentamiento se expresa mediante el forzamento radiativo, es decir, la

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

modificación del flujo neto radiativo (expresada en Wm^{-2}) en la tropopausa debido a la variación de un precursor del Cambio Climático[1].

El impacto de las alteraciones derivadas del Cambio Climático se extienden de manera transfronteriza, dando lugar a fenómenos meteorológicos extremos (inundaciones, sequías), salinización de fuentes de agua potable, etc. Todo ello afectará a la salud humana de forma directa, a través de enfermedades derivadas de las temperaturas extremas, o indirectamente, a través de hambrunas y cambios en la distribución de las enfermedades infecciosas a nivel mundial[2].

Una de las consecuencias que mejor relaciona impacto medioambiental y salud humana es su influencia en la distribución y concentración atmosférica de los contaminantes[4]. El conjunto de reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera y que determina la concentración de contaminantes resultantes depende de la meteorología: precipitaciones, velocidad de vientos, radiación solar[5]. Por ejemplo, las elevadas temperaturas tienden a incrementar los procesos fotoquímicos[5], y la mayor frecuencia de olas calor[5,6] y los sistemas de alta presión[5] reducirán la velocidad de los vientos, dando lugar al estancamiento de contaminantes[2,5].

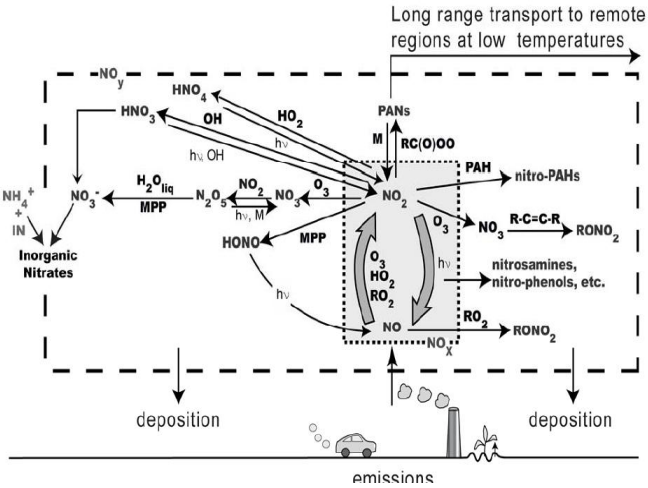


Figura 1. Diagrama esquemático del ciclo de las especies oxidadas reactivas de nitrógeno.

Los óxidos de nitrógeno, protagonistas de este trabajo, juegan un papel importante en la calidad del aire y los impactos de ésta en la salud humana[5,6]. Representan una mezcla de gases formados por nitrógeno y oxígeno: óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2), trióxido de dinitrógeno (N_2O_3), tetraóxido de dinitrógeno (N_2O_4) y pentaóxido de dinitrógeno (N_2O_5) principalmente, todos incluidos bajo la fórmula NO_x[7,8,9]. En general, cuando se habla de NO_x desde el punto de vista atmosférico, se entiende que únicamente es la mezcla de NO y NO_2, ya que estos óxidos se emiten en forma de NO que rápidamente se oxida a NO_2, aumentando de manera secundaria su concentración atmosférica. Éste reaccionará a su vez con otros compuestos a través de reacciones químicas en el seno de la atmósfera, tal y como se muestra en la Figura 1[8,9]. Los tiempos de formación difieren en función de la temperatura, siendo más

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

rápidos en verano (horas), que en invierno (días)[8]. Todas estas especies químicas constituyen el principal poder oxidativo de la atmósfera[9].

En cuanto a las fuentes de emisión, estas son tanto antropogénicas como naturales, siendo las primeras las mayoritarias. Los procesos de combustión a temperaturas elevadas suponen el mecanismo de formación primordial, como los que ocurren en los motores diésel de los automóviles o las plantas productoras de energía eléctrica, los cuales comportan las principales fuentes de origen humano[6,10]. A esto se suma la pequeña aportación de las fuentes naturales: la actividad microbiana en los suelos (aún más en los fertilizados)[8], la quema de biomasa (principalmente grandes incendios) y las tormentas eléctricas[11].

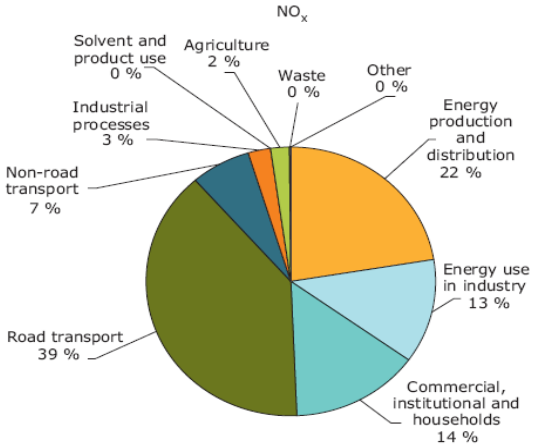
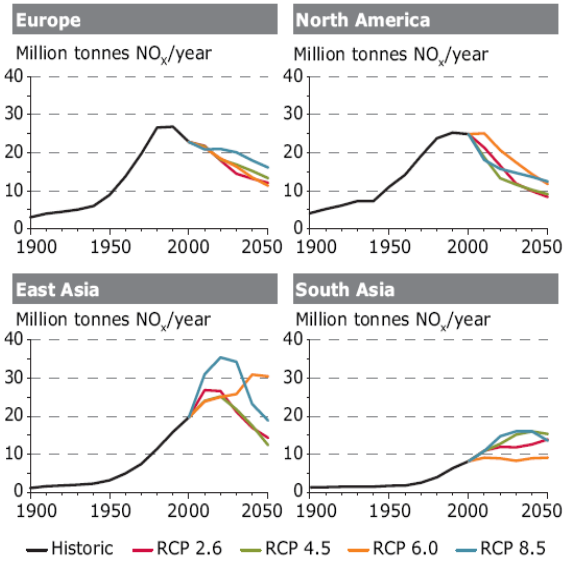


Figura 2.[10] Distribución de las emisiones antropogénicas por sector en 2012.

Figura 3.[12] Evolución de las emisiones de NO_x y tendencias futuras (1900-2050).



Si hablamos de datos, las emisiones globales de óxidos de nitrógeno se incrementaron rápidamente hasta 1990, fecha partir de la cual se estabilizaron en Norteamérica, disminuyeron en Europa y continuaron aumentando en Asia[12]. Particularmente, en la Unión Europea las emisiones disminuyeron un 51% entre 1990 y 2012 gracias al establecimiento de mejoras técnicas y en combustibles, como resultado de regulaciones y normas de emisión más estrictas que se implantaron en países como Francia, Alemania e Inglaterra[10].

Junto a las especies anteriormente citadas se encuentra el óxido nitroso (N_2O). Se trata de un gas de efecto invernadero que contribuye al agotamiento del ozono estratosférico y en un 6% al forzamiento radiativo, debido a que el aumento de sus emisiones antropogénicas rompió el equilibrio entre las emisiones naturales a partir de los suelos y océanos y las pérdidas estratosféricas.[13]

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Objetivos.

Este trabajo se realiza con la finalidad de alcanzar dos objetivos: en primer lugar, analizar cuál es la tarea que desempeñan los óxidos de nitrógeno en el Cambio Climático, para lo que será necesario conocer su comportamiento en la atmósfera una vez emitidos, así como el de los contaminantes secundarios resultantes de dicho comportamiento; y en segundo lugar, integrar y exponer los principales efectos que estos óxidos presentan en la salud humana y evidenciar el impacto en la Salud Pública de dichos efectos.

Metodología.

Se realizó una revisión bibliográfica de documentación obtenida en las principales webs de instituciones dedicadas al Cambio Climático. Estas son el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), United Nations Environment Programe (UNEP), National Aeronautics and Space Administration (NASA), US Environmental Protection Agency (EPA), European Environmental Agency (EEA), Organización Mundial de la Salud (OMS) y Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España, obteniéndose principalmente informes, publicaciones, artículos y noticias relacionados con diferentes aspectos del Cambio Climático. Por otra parte se llevó a cabo una búsqueda a través de PubMed y del buscador de Google para artículos académicos "Google Academy", de la cual se escogieron artículos científicos relacionados con la salud. Ambas búsquedas se realizaron tanto en inglés como en español, y a ellas se añade la investigación de la propia bibliografía de algunos documentos.

De esta manera se obtuvo un total de 130 referencias, ninguna más antigua del 2005. Posteriormente se realizó un cribado de dichas referencias para utilizar únicamente las más novedosas, relevantes y/o cuyo origen fuera más fiable, para lo cual se llevo a cabo una lectura más detenida de cada una, utilizando finalmente un total de 39 referencias que se detallan en el apartado "Bibliografía".

Resultados y discusión.

Comportamiento de los óxidos de nitrógeno en la atmósfera.

A nivel troposférico, los óxidos de nitrógeno (desde este momento NO_x) experimentan gran cantidad de reacciones químicas en las que participan también otros contaminantes como compuestos orgánicos volátiles (COV) y compuestos de azufre, que conducen, finalmente, a la formación de ozono troposférico, de partículas en suspensión y de aerosoles y a la

deposición ácida[14]. Basándonos únicamente en los procesos de la química atmosférica que tienen como protagonistas las especies oxidadas de nitrógeno, mayoritariamente se generan peroxiacilnitratos (PANs) y ácido nítrico (HNO_3)[8,9]. Además, estas reacciones tienen lugar tanto en la capa gaseosa como a nivel superficial en el caso de partículas, suelos, edificios y medios acuáticos[8].

A continuación se muestran las principales especies de la familia de los NO_x y su papel en la química atmosférica resumidas en la Tabla 1[8,9,14], en la que también se indican las vidas medias de cada compuesto[9]. Éstas son del orden de escalas de tiempo relativamente cortas, sobre todo comparadas con la del N_2O (más de 100 años)[9,13]. Esto puede llevar a pensar en la facilidad con la que estos compuestos se eliminan de forma natural de la atmósfera, pero la gran cantidad de emisiones de NO_x sumadas a la facilidad y rapidez que tienen estos compuestos para reaccionar[8] y dar lugar a otros más persistentes hacen que esa misión se vuelva complicada, y apoya aún más la necesidad de realizar un control rutinario de sus concentraciones atmosféricas y de disminuir sus emisiónes.

Molécula	**Fórmula**	**Vida media**	**Importancia en la química atmosférica**
Óxido nítrico	NO	h	Control radical OH y ozono en la troposfera
Dióxido de nitrógeno	NO_2	h-dias	Fuente de ozono troposférico
Radical nitrato	NO_3	s-h	Importante oxidante de la química nocturna. Por el día en presencia de luz reacciona rápidamente con NO.
Pentaóxdio de dinitrógeno	N_2O_5	h	Fuente nocturna de ácido nítrico. Reservorio diurno de NO, NO_2 y NO_3.
Ácido nitroso	HNO_2	min-h	Fuente alternativa de OH para la formación de ozono.
Ácido nítrico	HNO_3	d	Importante acidificante y sumidero de NO_x.
Ácido peroxinítrico	HNO_4	min-d	Reservorio en capas altas de la troposfera.
Aerosol nitrato	NO_3^-	D	Importante componente de aerosoles.
Nitratos orgánicos	$RO\text{-}NO_2$	sem	Componente fundamental de esta familia en la atmósfera marina. En concentraciones elevadas son indicadores de reacciones fotoquímicas troposféricas.
Peroxiacil nitratos (PANs)	$R\text{-}CO_3NO_2$	h-sem	Reservorio de NO_x. Indicadores de reacciones fotoquímicas troposféricas.

Tabla 1. Principales formas oxidadas de nitrógeno presentes en la troposfera, su importancia en la química atmosférica y vida media de cada una, expresadas en segundos (s), minutos (min), horas (h), días (d) y semanas (s).

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Todas las reacciones comentadas van a depender fundamentalmente de las concentraciones de NO_x, que, a su vez, dependerán de su producción en las diferentes fuentes de emisión, de su dispersión una vez hayan alcanzado la atmósfera y del tiempo medio de residencia de los diferentes compuestos, es decir, de su estacionalidad[15]. Por ejemplo, los vientos más intensos predominan en las capas más altas de la troposfera, lo que hace que las emisiones a partir de fuentes elevadas se dispersen más rápidamente que las emitidas a baja altura[8,14]. Además, en las zonas próximas a las fuentes emisoras la concentración de NO será mayor, favoreciendo su conversión a NO_2 y agilizando el ciclo de reacciones.

Otros factores predominantes serán la temperatura e intensidad de la luz solar, que hacen que los procesos que tienen lugar durante el día y durante la noche sean diferentes[9,14]. En la química diurna se produce el "ciclo de los óxidos de nitrógeno"[14], cuyo balance final es el aumento de los niveles de ozono troposférico, a pesar de que la mayor parte del NO reacciona con el propio ozono produciendo NO_2. Sin embargo, la incidencia de la radiación solar es elevada durante el día y con ella la fotólisis, la cual reconvierte el NO_2 en NO a nivel troposférico, formando oxígeno atómico y permitiendo la formación de ozono[9,14]. Por el contrario, durante la química nocturna y debido a la ausencia de luz solar, dicha reconversión no tiene lugar y el NO_2 evoluciona a través de procesos oxidativos que concluirán en la producción de ácido nítrico tras reaccionar con el agua en forma de vapor[9].

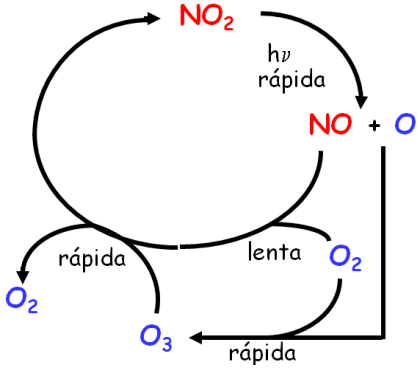


Figura 4. Ciclo fotodinámico de los óxidos de nitrógeno.

Al analizar todo lo anterior se observa que el clima (vientos, temperatura) va a ser el determinante principal de las reacciones anteriores. Cambio Climático y contaminación atmosférica se encuentran directamente relacionados, pues debido a los cambios en las condiciones meteorológicas, los procesos físicos y químicos atmosféricos que sufren los NO_x se han visto alterados[5], ya que sus concentraciones aumentan a causa de la disminución de su dispersión como consecuencia de mayores episodios anticiclónicos y al aumento de su emisión por el elevado consumo energético (aparatos de climatización)[15]. No obstante, en realidad parece ser un ciclo que se retroalimenta, pues estos óxidos, a su vez, contribuyen en el Cambio Climático, bien sea por ellos mismos, como es el caso del N_2O, o a través de la formación de contaminantes secundarios como el ozono.

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Implicación en el Cambio Climático.

Implicaciones directas: óxido nitroso (N_2O).

El óxido nitroso (N_2O) es otro compuesto perteneciente a la familia de los NO_x, pero con un comportamiento atmosférico diferente al resto de "familiares" [7]. Se encuentra en la atmósfera de forma natural, emitido desde suelos, océanos, ríos y estuarios principalmente,[16] resultante de la acción de microorganismos[17]. Forma parte del ciclo biogeoquímico del nitrógeno[17,18], como un subproducto minoritario de ciertas reacciones de dicho cliclo[18]. Estas fuentes de emisión naturales suponen el 64% del total[16], lo que quiere decir que un elevado 36% proviene de actividades antropogénicas, como son la agricultura, a través de fertilizantes sintéticos; el transporte, a través de los procesos de combustión en los motores de los vehículos; y la industria, sobre todo en la producción del ácido nítrico[17,18]. Por este motivo hay posturas opuestas en cuanto a que la totalidad del N_2O proveniente de medios acuáticos suponga una emisión natural[16], ya que muchos de ellos están altamente contaminados con compuestos de nitrógeno provenientes de la atmósfera mediante deposición húmeda y seca, del arrastre de fertilizantes y del tratamiento de aguas residuales. Además, las elevadas cantidades de este compuesto en la atmósfera se ven agravadas a través de otras actividades humanas como la deforestación[16,18].

En cuanto a los procesos que eliminan el N_2O de la atmósfera, la fotólisis y las reacciones de oxidación que tienen lugar en la estratosfera son los principales[19]. A pesar de la existencia de estos mecanismos, la vida media de este gas es de 131 años aproximadamente[13,19], lo que, sumado al aumento significativo de sus emisiones antropogénicas en las últimas décadas[18], hizo que su concentración en la atmósfera en 2011 fuera un 19% mayor que en 1750[19].

En relación al Cambio Climático, el N_2O presenta un valor de forzamiento radiativo de 0.17 ± 0.03 W m^{-2} [19]. El hecho de que el valor del forzamiento radiativo sea positivo quiere decir que contribuye aumentando el balance energético de la Tierra, es decir, que contribuye a su calentamiento. Se le conoce como "el GEI olvidado", pues a pesar de su bajo forzamiento radiativo, su elevada eficiencia absorbiendo radiación infrarroja[18] y su elevada vida media hacen que su capacidad de calentamiento sea trescientas veces mayor a la del CO_2 (principal GEI de larga duración, cuyo forzamiento radiativo es de 1.83 ± 0.20 W m^{-2} [19].) en un período de 100 años[16,18]. Es el tercer GEI en importancia[18,19], por detrás del CO_2 y el metano, y la suma de los tres contribuye en más del 85% del forzamiento radiativo total de la mezcla de

GEI[18], lo que le convierte en un potente e infravalorado precursor del calentamiento global y el Cambio Climático.

Por otro lado, los procesos de fótolisis que eliminan el N_2O de la estratosfera lo convierten en una fuente de NO_x[19], y de esta forma interviene en la destrucción de la capa de ozono. Una vez que ha alcanzado la estratosféra, la luz solar lo descompone en nitrógeno y oxígeno, formando posteriormente NO[18], el cual reacciona con el ozono como se ha explicado anteriormente. No obstante, esta acción se ve disminuida en presencia de aerosoles, metano y a causa del enfriamiento estratosférico producido por el incremento de CO_2[18]. En un principio este efecto no era tenido en cuenta, pues el N_2O no se considera una sustancia causante de la depleción de ozono estratosférico como tal, pero a partir de la reducción de CFCs conseguida gracias al Protocolo de Montreal su contribución al agujero de la capa de ozono salió a la luz. Esto lo convierte en un destructor de ozono estratosférico a tener en cuenta,[18] a pesar de la acción de los factores limitantes comentados anteriormente, ya que sus emisiones no han hecho más que incrementarse.

Implicaciones indirectas.

Ozono troposférico.

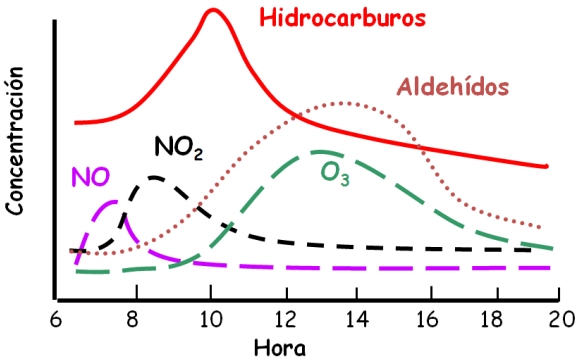
Durante la química diurna de los NO_x se produce la formación de ozono troposférico (desde este momento O_3), denominado así por su presencia en la troposfera. A diferencia del estratosférico, que nos protege de la radiación ultravioleta, éste presenta efectos perjudiciales tanto para la salud como para el medio ambiente, ya que, debido a su abundancia y toxicidad, es el principal oxidante del denominado smog fotoquímico[20], una mezcla compleja de contaminantes con potencial oxidante que se observa con frecuencia en la superficie de las urbes como una niebla marrón o amarillenta[21]. El smog (y el O_3) se forma en la troposfera y en la capa limítrofe contaminada gracias a la acción de NO_x (ya explicada), VOCs, hidrocarburos, monóxido de carbono, metano y oxígeno en presencia de radiación ultravioleta procedente del sol[20,21,22]. Por su parte, el O_3 también puede originarse de forma natural a través de tormentas eléctricas y desplazarse desde la estratosfera[19,20].

No obstante, varios son los factores que determinan la formación de O_3, como las concentraciones de precursores, el tiempo o las condiciones climáticas[21,22]. Estas últimas, que comprenden la temperatura, la presión, la dirección y velocidad del viento y la humedad relativa[21], son las más importantes[22] e implican que lás máximas concentraciones de O_3 se

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

alcancen durante la mañana, llegando al pico máximo durante las horas de mayor insolación (12-16 h). A escala anual, la mayor producción tendría lugar en los meses de verano (mayo-septiembre)[20,22], totalmente al contrario de lo que sucede con el resto de contaminantes atmosféricos, los cuales experimentan sus concentraciones más elevadas en los meses invernales, coincidiciendo con un mayor uso de la calefacción y con el estancamiento atmosférico (anticiclones e inversión térmica)[20].

Figura 5. Evolución de los contaminantes a lo largo del día.



En cuanto a los mecanismos que retiran el O_3 de la atmósfera destaca la fotólisis, seguida de reacciones con vapor de agua y su reacción con HO_2. Además, los NO_x limitan su producción a través del NO, por lo que el ratio entre las concentraciones de NO_2 y NO va a determinar la concentración de ozono y, con ello, el equilibrio fotoquímico durante el día[9]. Por su parte, los radicales peroxo producen un desequilibrio que permite la conversión NO_2 a NO sin consumo de ozono, facilitando su acumulación[9,14].

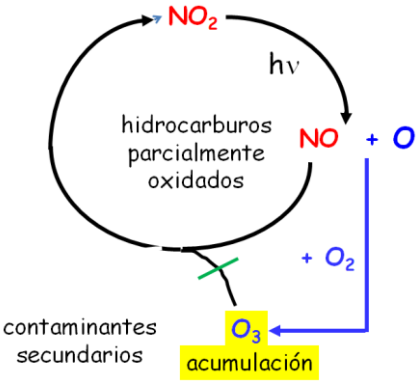


Figura 6. Proceso de acumulación del ozono troposférico formado a partir de NO_x.

De este modo, aunque parece que reduciendo las emisiones de NO_x evitaríamos su formación, se ha observado que las concentraciones más elevadas de O_3 se miden en áreas donde hay menos emisiones de éstos óxidos[20]. La explicación reside en que en zonas con emisiones de NO_x elevadas (núcleos urbanos) el NO emitido reacciona inmediatamente con el O_3 existente y disminuye sus niveles[20]. De este modo, en áreas contaminadas los principales catalizadores de la reacción de formación de O_3 son los COVs, mientras que en las zonas de baja contaminación el proceso estaría limitado por los NO_x. En consecuencia, para reducir los niveles de O_3 y sus efectos nocivos sería necesario controlar y reducir las emisiones de NO_x y de COVs.

En cuanto a la contribución del O_3 al Cambio Climático, éste es un GEI de vida media corta (semanas) con forzamiento radiativo de 0.40 ± 0.20 Wm^{-2}, aunque éste varía enormemente en función de la altitud y la latitud, debido a la acción de la temperatura, las nubes y el vapor de agua[19]. Por otra parte, también contribuye de forma indirecta mediante los

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

efectos nocivos que causa en la vegetación (vía importante de eliminación del CO_2) disminuyendo su productividad, dañando su foliaje y aumentando su suceptibilidad a enfermedades y plagas[22].

Lluvia ácida.

Uno de los procesos por el que los contaminantes son eliminados de la atmósfera es su deposición, que puede ser seca o húmeda, siendo en este último caso arrastrados por precipitaciones[14] (lluvia, nieve, hielo, rocío)[23]. De esta forma se eliminan tanto los ácidos resultantes de reacciones atmosféricas como los NO_x como tal, los cuales pueden oxidarse una vez depositados en la superficie terrestre[16,23]. De esta manera se forma la lluvia ácida, con la intervención adicional del dióxido de azufre y el amoniaco[23,24].

Como en otras ocasiones, las condiciones climatológicas van a determinar la presencia de partículas y gases ácidos en la atmósfera[23,24], que además pueden transportarse gracias a los vientos a miles de kilómetros originando efectos devastadores en lugares muy lejanos a la fuente de emisión, convirtiendo este problema en transfronterizo[23].

Los efectos más notorios de la lluvia ácida se observan en la destrucción de los edificios y la vegetación, pero también intervienen en la acidificación de suelos y ecosistemas acuáticos[23], en los que el aumento de los niveles de nitrógeno conlleva a su eutrofización[24]. Este aumento excesivo de nutrientes en los medios acuáticos (eutrofización) va a dar lugar al crecimiento de algas y pérdida de lechos de vegetación marina y arrecifes de coral[24], los cuales constituyen un importante almacén de CO_2 en forma de carbonato cálcico. En definitiva y al igual que ocurría con el O_3, la contribución de la lluvia ácida al Cambio Climático tiene lugar de forma indirecta, a través de la reducción de algunas vías de eliminación del principal GEI y precursor del calentamiento global (CO_2).

Efectos en la salud.

Los NO_x son sustancias irritantes y corrosivas. La principal vía de exposición es inhalatoria, pero también pueden actuar a través del contacto con la piel y mediante ingestión[7]. Una vez en el organismo pueden transformarse en ácido nítrico o nitroso (como ocurre en las vías aéreas distales) y dañar la función y estructura celular; en radicales libres que oxidan proteínas, peroxidan lípidos y dañan la membrana celular; o alterar macrófagos y la función inmune, disminuyendo la respuesta a infecciones. Además, si alcanzan concentraciones elevadas en forma de NO, este oxidará el hierro hemoglobínico, causando

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

metahemoglobinemia, la cual puede afectar al feto en caso de mujeres embarazadas. Por su parte, el NO_2 puede causar daño en el DNA si alcanza dicho nivel[7,25].

La exposición habitual a estos óxidos no se produce de forma individual, sino que se encuentran formando parte de un conjunto de compuestos que constituyen la contaminación atmosférica, entre ellos los aerosoles (constituyentes del material particulado) y ozono troposférico, ambos generados a partir de NO_x[20]. El NO_2 ha sido utilizado como indicador de dicha mezcla, sobre todo de los contaminantes generados mediante combustión (como los emitidos por el tráfico)[26]. Es complicado discernir si es un contaminante concreto o la mezcla de todos ellos la causa de las diferentes patologías que se han relacionado con la exposición a dicha contaminación atmosférica[26,27], por lo que a los efectos asociados al NO_2 individualmente bien podrían haber contribuido otros contaminantes relacionados como NO o el material particulado[26]. Sin embargo, la relación del NO_2 con algunos efectos patológicos a corto plazo se ha mantenido tras realizar un ajuste con otros contaminantes, lo que parece indicar que en este caso si existe un efecto propio[27]. Esto no ocurre con los estudios a largo plazo, ya que la concentración de NO_2 en relación al resto de contaminantes es muy baja, por lo que su evidencia toxicológica en estos casos es limitada[26]. Aun así, la OMS ha establecido un valor guía para el NO_2, que es de 40$\mu g/m^3$ como media anual y de 200 $\mu g/m^3$ como media de una hora[26].

Tanto los efectos asociados de forma directa con el NO_2 como los atribuidos a la contaminación del aire en general van a depender de la dosis de contaminante(s), el tiempo y el lugar de exposición y de factores individuales como la edad, el estado nutricional, el nivel socioeconómico y la predisposición o vulnerabilidad[5,25]. En consecuencia, es importante identificar los grupos de población particularmente vulnerables a la contaminación del aire. En estos se incluyen niños, embarazadas, pacientes con enfermedades crónicas (diabetes, hipertensión), cardiovasculares, respiratorias o renales; los individuos en edad avanzada (funciones fisiológicas disminuidas), los trabajadores más expuestos a la contaminación atmosférica y las personas con bajo nivel socioeconómico[4,5]. En este último caso se desconoce si se debe a la mayor exposición o a la peor calidad de vida[4].

En el caso de los niños, la inmadurez fisiológica y la diferente exposición (pasan más tiempo en exteriores) son la principal causa de su vulnerabilidad[4]. Además, debido a su corta edad, el impacto en términos de años de vida perdidos (por incapacidad) será mayor, pues desarrollarán enfermedades a una edad más temprana, junto con que las consecuencias

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

negativas de la exposición tendrán mayor tiempo para manifestarse, por lo que sufrirán enfermedades más graves en la época adulta.

Por su parte, las gestantes son un grupo de riesgo debido a los efectos que la contaminación del aire provoca sobre el feto. Diversos estudios demuestran que la exposición de la madre a la contaminación atmosférica puede afectar al desarrollo intrauterino del bebé, provocando en general menor peso al nacer[6]. En cuanto a los nacimientos prematuros serían necesarias más pruebas, pero las existentes sugieren que también existe una relación causal[4,28]. En el caso de las malformaciones, un estudio realizado en Barcelona[29] no encontró vínculo alguno con la exposición a la contaminación relativa al tráfico, excepto en la presencia de coartación de la aorta en los recién nacidos.

En general, la mayoría de los estudios, tanto epidemiológicos como en animales, sitúan a los sistemas respiratorio y cardiovascular como los más afectados[25]. En cuanto al sistema respiratorio, la mayoría de NO_x son irritantes y actúan a nivel de las vías respiratorias bajas[7,25]. Teóricamente, concentraciones no demasiado elevadas (como las presentes en el aire) causan disnea y tos y si la exposición es continuada pueden causar broncoespasmo y edema pulmonar[7].

La exposición al NO_2 ha sido asociada con la disminución de la función pulmonar o de su desarrollo, aumento de síntomas respiratorios, aumento de la incidencia y prevalencia de asma y de la incidencia de cáncer, morbilidad respiratoria y mortalidad[28]. Además, una revisión realizada en el año 2014[30] lo relacionaba, junto al material particulado y dióxido de azufre, con enfermedades como bronquitis, neumonía, enfermedad obstructiva crónica (EPOC) y apoyaba su asociación con el cáncer de pulmón. La relación con dicho tipo de cáncer también se demostró en otro estudio del mismo año[31] en el que se evaluó además la distancia a zonas con un elevado volumen de tráfico, resultando una clara asociación positiva entre exposición a NO_2 y cáncer de pulmón, con mayor riesgo de aparición en individuos que habitaban cerca de zonas con elevado tráfico. En cuanto al asma, un estudio en el que se mide el impacto de la asociación entre exposición al tráfico y prevalencia de asma y rinosinusitis crónica concluyó que estas enfermedades aumentaban sólo en los individuos alérgicos[32], lo que sugiere que la susceptibilidad es un factor verdaderamente importante a la hora del desarrollo de enfermedades causadas por la contaminación.

Cabe destacar que los niños presentan una vulnerabilidad respiratoria a los tóxicos ambientales diferente[4]. En su caso se ha sugerido que la exposición a NO_2 disminuye el desarrollo de la función pulmonar, aunque no en demasía[33], y causa infecciones

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

respiratorias[45]. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el 50% de las muertes infantiles por neumonía se deben a la inhalación de contaminantes[34]. Algunos estudios incluso han asociado dicha exposición con la aparición de asma[35]. La explicación reside en que las vías aéreas y alveolos se encuentran en desarrollo y además los niños pasan más tiempo expuestos, como se ha explicado anteriormente.

En el caso del aparato circulatorio, los NO_x pueden acelerar el pulso levemente, agrandar el corazón y provocar colapso circulatorio[7]. Muchas de las hospitalizaciones y las visitas a urgencias debidas a diagnósticos cardiovasculares o cardíacos están relacionadas con la exposición a corto plazo al NO_2[33]. Por ejemplo, un estudio reciente[36] concluyó que dicha exposición aumentaba la masa del ventrículo derecho, bien a través de la hipoxia que genera vasoconstricción pulmonar, la cual aumenta la resistencia y el trabajo del corazón, o bien a través de la sobreexpresión de genes y proteínas inflamatorias en dicho ventrículo. Adicionalmente, otro estudio[37] demostró que la exposición al humo de los tubos de escape provocaba que los niveles de la proteína CRP se incrementaran, hecho relacionado con el desarrollo de enfermedades cardiovasculares. No obstante, un estudio de casos y controles[38] no encontró evidencias entre la exposición a NO_2 a largo plazo y el aumento de ingresos a causa de accidentes cerebrovasculares.

Finalmente, los NO_x también pueden producir daños dermatológicos y oculares. En el caso de la piel son irritantes, y además la presencia de agua en la misma puede dar lugar a la formación de ácido nítrico y provocar quemaduras de segundo y tercer grado[7]. En los ojos también causan irritación y quemaduras, pudiendo llegar a provocar ceguera si la concentración es muy elevada[7]. Cabe destacar que en el caso de las concentraciones a las que los NO_x están presentes en la atmósfera sólo causarían irritaciones en ambos órganos.

Todos estos efectos nocivos inciden en la Salud Pública, aunque en este caso sí que definitivamente se habla de contaminación atmosférica en general. Como ya se ha comentado, entre los efectos de dicha contaminación en la salud se encuentran alteraciones de la función pulmonar, problemas cardíacos y otros síntomas y molestias, pero pueden llegar hasta incrementar las defunciones y los ingresos hospitalarios[4,20]. En la Figura 7 se muestran los porcentajes de fallecimientos causados por diferentes enfermedades, todas ellas atribuidas a la contaminación[39].

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

A pesar de los avances y las medidas adoptadas para disminuirla, la contaminación del aire sigue siendo un problema destacable de Salud Pública, el cual, según la OMS, causa unos dos millones de defunciones prematuras en todo el planeta[4], y unas 300.000 en el caso de Europa[4]. Además, pruebas recientes indican que es una de las principales causas evitables de mortalidad y morbilidad en todo el mundo[34]. A todo esto se suma que la contaminación atmosférica no sólo implica una amenaza a la salud, sino que también suponen una carga económica debida a hospitalizaciones, visitas a urgencias y días de trabajo perdidos por enfermedad[5].

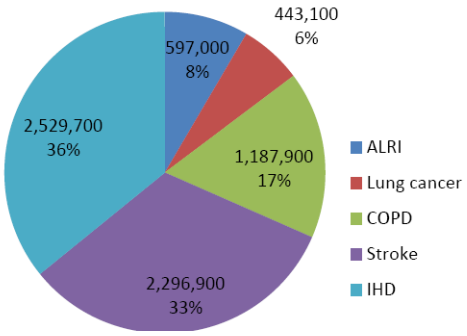


Figura 7. Porcentaje de defunciones a causa de enfermedades atribuidas a la contaminación atmosférica en 2012.

Estudios realizados en los últimos años revelaron que los efectos de la exposición crónica superan en magnitud a los de la exposición eventual[4,20]. En los estudios a corto plazo se valoran indicadores de salud de la población (como defunciones) y permiten evidenciar, por ejemplo, que incrementos de 10μg/m^3 de contaminantes aumentan un 0,6% las defunciones europeas[4]. Por el contrario, los estudios a largo plazo permiten vincular la contaminación con el padecimiento de enfermedades de desarrollo prolongado y estimar la pérdida en esperanza de vida, que en el caso de Europa es de casi un año[4].

Lo más destacable es que la totalidad de la población está expuesta, de modo que la relación entre la población de riesgo y la gravedad del efecto experimenta una gradación: cuanto más grave es el efecto, el porcentaje de población afectada es menor[4´20]. Esto hace que aunque la magnitud del impacto en salud sea pequeña, la proporción atribuible a la contaminación atmosférica es importante[15]. Es decir, que la contaminación del aire supone un riesgo para la salud incluso a concentraciones relativamente bajas a causa del gran número de individuos que se encuentran expuestos a dicho riesgo[34].

Por otro lado, las fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos lo son igualmente de GEI, por lo cual las medidas encaminadas a reducir las emisiones desde dichas fuentes originan beneficios para la salud doblemente importantes, ya que disminuyen tanto los impactos directos de dicha contaminación en la incidencia de las diferentes enfermedades relacionadas como los impactos sanitarios indirectos del Cambio Climático[34].

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Conclusiones.

Los óxidos de nitrógeno son una mezcla de gases de vital importancia, tanto en el Cambio Climático como en la salud humana, por lo que las medidas o políticas encaminadas a disminuir sus emisiones suponen un beneficio tanto medioambiental como social o económico. Por un lado, el ciclo fotodinámico que experimentan en la atmósfera da lugar a una gran variedad de compuestos, y entre ellos algunos destacables como el ozono troposférico o el ácido nítrico, ambos contribuyentes al calentamiento global tanto directa como indirectamente. Por otro lado, el óxido nitroso es un importante GEI que además de intervenir en el Cambio Climático de forma directa, está implicado en la eliminación del ozono estratosférico, compuesto fundamental para el desarrollo de la vida terrestre.

Por su parte, la nube contaminante generada en el ciclo de los óxidos de nitrógeno va a causar considerables efectos nocivos en la salud, algunos graves como el cáncer de pulmón, lo que implica que la calidad del aire supone un factor de riesgo verdaderamente importante, ya que, además, son muchos los individuos que se exponen de forma habitual, sobre todo en las grandes urbes. Esto convierte a la contaminación atmosférica en un problema de Salud Pública que hay que remediar cuanto antes.

Bibliografía.

1. Planton S. *Annex III: Glossary*. En: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press; 2013. p. 1447-1465.
2. Galán Madruga, D., Garrido Morales, JL. Cambio Climático. Perspectivas futuras. Observatorio Medioambiental. 2012; 15: 11-18.
3. Cambio Climático: Bases Físicas. Guía resumida del Quinto Informe de Evaluación del IPCC grupo de trabajo I. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid, España. 2013.
4. Cambio Global España 2020/50. Cambio climático y salud. Centro Complutense de Estudios e Información Medioambiental. Asturias, España. 2012.
5. Peel, J. L., Haeuber, R., Garcia, V., Russell, A. G., Neas, L. Impact of nitrogen and Climate Change interactions on ambient air pollution and human health. Biogeochemistry 2012. Disponible en: http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10533-012-9782-4#close.
6. Ballester Díez, F., Cárdaba Arranz, M., Díaz Jiménez, J., Feo Brito, F., Galán Soldevilla, C., García Dos Santos-Alves, S., et al. *Calidad del aire*. Impactos del Cambio Climático

en la Salud. Ministerio de Sanidad Servicios Sociales e Igualdad. Madrid, España. 2013. p. 1120-184.

7. Nitrogen Oxides (NO, NO_2, and others). General Information. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). [mayo 2015]. Disponible en: http://www.atsdr.cdc.gov/mmg/mmg.asp?id=394&tid=69.
8. Integrated Science Assessment for Oxides of Nitrogen - Health Criteria. United States Environmental Protection Agency (EPA). Research Triangle Park, NC. 2008. p. 38 – 43. Disponible en: http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=194645.
9. S. Penkett, S. Gilge, C. Plass-Duelmer, I. Galbally, N. Brough, J. Bottenheim, et al. WMO/GAW Expert Workshop on Global Long-term Measurements of Nitrogen Oxides and Recommendations for GAW Nitrogen Oxides Network. World Meteorological Organization (WMO). Geneva, Switzerland. 2011. p. 11-16.
10. European Union emission inventory report 1990-2012 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP). European Environment Agency (EEA). Luxembourg. 2014. Nº12. p. 49-51.
11. NASA researches Explore Lightning's NO_x-ious impact on Pollution, Climate. National Aeronautics and Space Administration (NASA) [mayo 2015]. Disponible en: http://www.nasa.gov/topics/earth/features/nox_lightning.html.
12. Global megatrend 10: Increasing environmental pollution. Assesssment of global megatrends – an update. European Environment Agency (EEA). Luxembourg. 2014.
13. Boletín de la OMM sobre los Gases de Efecto Invernadero. Organización Meteorológica Mundial (OMM). Ginebra, Suiza. 2014. Nº 10. p. 1-8.
14. Galán Madruga, D., Fernández Patier, R. Implicación de los NO_x en la química atmosférica. Revista Electrónica de Medio Ambiente UCM. 2006. 2: 90-103.
15. Ballester, F. Contaminación atmosférica, Cambio Climático y Salud. Revista Española de Salud Pública. 2005; 78(2): 159-175.
16. Methane and Nitrous Oxide Emissions from Natural Sources. United States Environmental Protection Agency (EPA). Washington DC, USA. 2010. p. 29-38.
17. Overview of Greenhouse Gases. United States Environmental Protection Agency (EPA) [mayo 2015]. Disponible en: http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/n2o.html.
18. Drawing Down N_2O to Protect Climate and the Ozone Layer. A UNEP Synthesis Report. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya. 2013. p. 17-24.
19. Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestvedt, J. Huang, et al. *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*. En: Climate Change 2013: The Physical

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.

Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press; 2013. p. 658-740.

20. Ciudad y transporte. Calidad del aire y Salud. Ecología y Desarrollo (ECODES) [mayo 2015]. Disponible en: http://www.ecodes.org/salud-calidad-aire/Monografico-Ciudad-y-Transporte.
21. Mohammadi, H., Cohen D., Babazadeh M., Rokni L. The Effects of Atmospheric Processes on Tehran Smog Forming. Iranian J Publ Health.2012. 41(5): 1-12.
22. L. Mauzerall D., Sultan B., Kim N., F. Bradford, D. NOx emissions from large point sources: variability in ozone production, resulting health damages and economic costs. Atmospheric Environment. Elselvier 2005. 39: 2851–2866.
23. Acidificación. Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) [mayo 2015]. Disponible en: http://www.eea.europa.eu/es/publications/92-828-3351-8/page004.html.
24. Los Efectos de la Lluvia Ácida: aguas de superficie y animales acuáticos. United States Environmental Protection Agency (EPA) [mayo 2015]. Disponible en: http://www.epa.gov/acidrain/spanish/effects/surface_water.html.
25. Kampa, M., Castanas, E. Human health effects of air pollution. Environmental Pollution. Elsevier 2008. 151:362-367.
26. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial 2005. Organización Mundial de la Salud (OMS). Ginebra, Suiza. 2005. p. 19-20.
27. Review of evidence on health aspects of air pollution: REVIHAAP Project. World Health Organization (WHO). Geneva, Switzerland. 2013. Copenhagen, Denmark. p. 14-19.
28. Statement on the evidence for the effects of nitrogen dioxide on health. Committee of the Medical Effects of Air Pollutants (COMEAP). 2015. Disponible en: https://www.gov.uk/government/publications/nitrogen-dioxide-health-effects-of-exposure.
29. Schembari, A., Nieuwenhuijsen, M. J., Salvador, J. de Nazelle, A., Cirach, M., Dadvand, P., et al. Traffic-Related Air Pollution and Congenital Anomalies in Barcelona. Environmental Health Perspectives. 2014. 122(3): 317-323.
30. Rahman Khan R., Siddiqui M.J.A. Review on effects of Particulates; Sulfur Dioxide and Nitrogen Dioxide on Human Health. International Research Journal of Environment Sciences. 2014. 3(4): 70-73.
31. Hamra G.B., Laden F., Cohen A.J., Raaschou-Nielsen O., Brauer M., Loomis D. Lung Cancer and Exposure to Nitrogen Dioxide and Traffic: A Systematic Review and Meta-

Analysis. Environmental Health Perspectives (EHP). 2015. Diponible en: http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1408882.

32. Lindgren, A., Stroh, E., Nihlén U., Montnémery P., Axmon, A., Jakobsson, K. Traffic exposure associated with allergic asthma and allergic rhinitis in adults. A cross-sectional study in southern Sweden. International Journal of Health Geographics. 2009, 8(25): 1-10.
33. Gehring, U., Gruzieva, O., Agius, R. M., Beelen, R., Custovic, A., Cyrys, J., et al. Air Pollution Exposure and Lung Function in Children: The ESCAPE Project. Children's Health. 2013. 121(11): 1357-1364.
34. Salud y Medio Ambiente: impacto sanitario de la contaminación del aire. Consejo Ejecutivo Organización Mundial de la Salud (OMS). Ginebra, Suiza. 2014. Disponible en: http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB135/B135_4-sp.pdf.
35. James Gauderman, W.J., Avol, E., Lurmann, F., Kuenzli, N., Gilliland, F., Peters, J., McConnell, R. Childhood Asthma and Exposure to Traffic and Nitrogen Dioxide. Epidemiology. 2005; 16: 737–743.
36. Lanki, T., Hampel, R., Tiittanen, P., Andrich, S., Beelen, R., Brunekreef, B., et al. Air Pollution from Road Traffic and Systemic Inflammation in Adults: A Cross-Sectional Analysis in the European ESCAPE Project. Environmental Health Perspectives (EHP). 2015. Disponible en: http://dx.doi.org/10.1289/ehp.1408224.
37. Leary, P.J., Kaufman J. D., Graham Barr, R., Bluemke D., Curl C. L., Hough C. L., et al. Traffic-related Air Pollution and the Right Ventricle. American Thoracic Society. 2014. 189(9): 1093–1100.
38. Oudin, A., Stroh, E., Strömberg, U., Jakobsson, K., Björk, J. Long-term exposure to air pollution and hospital admissions for ischemic stroke. A register-based case-control study using modelled NOx as exposure proxy. BioMed Central Public Health. 2009. 301(9): 1-12.
39. Burden of disease from the joint effects of Household and Ambient Air Pollution for 2012. World Health Organization (WHO). 2014. Geneva, Switzerland. p. 1-3.

Este trabajo tiene una finalidad docente. La Facultad de Farmacia no se hace responsable de la información contenida en el mismo.