

María Alejandra Martínez-Ghersa

Analía I Menéndez

Pedro E Gundel

Instituto de Investigaciones Fisiológicas y Ecológicas
vinculadas a la Agricultura (Ifeva), UBA-Conicet

Ozono en el aire

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea la Tierra, compuesta por una mezcla de gases y pequeñas partículas que reaccionan entre sí. Los tres gases más abundantes que contiene son nitrógeno, oxígeno y argón; constituyen el 99% de la atmósfera, cuya porción más baja se llama *tropósfera* y se extiende desde al suelo hasta unos 11km de altura, es decir hasta unos 3000m por encima de la cumbre del monte Everest. Su composición puede variar debido a cambios en la concentración de alguno de sus componentes o por la introducción de sustancias nuevas. Cuando dicha alteración es muy importante y genera un riesgo para la salud de los seres vivos, hablamos de *contaminación atmosférica*.

La contaminación atmosférica puede ocurrir por procesos naturales, como erupciones volcánicas, o por la actividad humana, por ejemplo, por el uso de combustibles fósiles (carbón, gas natural, derivados del petróleo) para

transporte, industria o generación eléctrica. Al respecto, se suele hablar de *contaminantes primarios* y *secundarios*. Entre los primarios, que son aquellos emitidos directamente a la atmósfera por la actividad contaminante, están los óxidos de carbono y de nitrógeno. De los secundarios, que se forman en la atmósfera a partir de reacciones que ocurren entre los primarios, algunos ejemplos son los ácidos sulfúrico y nítrico. Otro ejemplo es el ozono (O_3), una variante del oxígeno, que también se forma en ciertos procesos naturales y cuya molécula está constituida por tres átomos, mientras que la de oxígeno (O_2) está compuesta por dos.

Aumento del ozono en la tropósfera

A partir de la segunda mitad del siglo XX, las concentraciones de ozono en la baja atmósfera aumentaron entre

¿DE QUÉ SE TRATA?

¿Una amenaza para la producción de alimentos?



Cámaras montadas en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la UBA para estudiar el efecto de contaminantes de la atmósfera en plantas. Como se aprecia, son recintos cilíndricos constituidos por un marco de aluminio y paredes de plástico que dejan pasar la luz pero no el aire. Este se hace entrar por la base de la cámara, se le agrega el contaminante y se extrae por el techo. La concentración de gases dentro del recinto se controla constantemente tomando en forma automática muestras que analizan aparatos ubicados fuera de la cámara. Puertas de acceso permiten entrar y sacar plantas. El ozono para los experimentos se produce mediante descargas eléctricas, que lo forman a partir del O_2 del aire.

dos y cinco veces en las latitudes medias del hemisferio norte. El cambio se asocia con el aumento de las emisiones de gases (que en este contexto se llaman *gases precursores del ozono*) originadas en el crecimiento económico de los países industrializados, especialmente en Europa, Norteamérica y el este de Asia. Se estima que en la última región las emisiones de uno de dichos gases precursores, el óxido nítrico (NO), aumentaron desde 2001 a razón de 7% anual. En varias zonas del mundo, en que la concentración de ozono a principios del siglo XX oscilaba entre 10 y 20 partes por billón (ppb), en la actualidad supera las 40ppb.

El contenido de ozono en la tropósfera depende de la concentración de los contaminantes primarios que actúan como precursores y de la llegada de ozono desde las capas más altas de la atmósfera. También puede ser transportado por los vientos desde lugares contaminados a otros no contaminados, incluso de un continente a otro.

El ozono tiene una fuerte capacidad de alterar por oxidación la composición química de las estructuras celulares de los seres vivos, aun en bajas concentraciones. Por ello, su presencia en la tropósfera y cómo cambió en el tiempo resultan importantes. El mencionado valor de 40ppb se toma hoy como el límite sobre el cual el ozono

puede, entre otras cosas, dañar el crecimiento de los cultivos.

Se calcula que hoy las pérdidas de rendimiento de cultivos de maíz, trigo y soja asociadas con el ozono alcanzan mundialmente valores de entre el 2% y el 15% de las cosechas. Se prevé que de ahora a 2020 el ozono de la tropósfera se incremente en 13ppb en Asia, lo cual podría reducir el rendimiento de la soja hasta 20% y el del poroto hasta 50%, si bien para el trigo y el arroz esas pérdidas podrían ser menores. Urge, pues, entender cómo podría modificarse la producción mundial y regional de alimentos si el ozono del aire continúa aumentando.

Para la Argentina, como para gran parte de América Central y del Sur, prácticamente no existen registros históricos de contaminación del aire, ni de emisión de gases precursores del ozono. En Córdoba y

Salta se han observado síntomas de daño por ozono en soja y girasol, lo que sugiere que en determinados momentos del año el nivel del gas podría superar el mencionado umbral de daño.

El ozono y las plantas

El ozono ingresa en las plantas por los orificios de los tejidos superficiales de las hojas llamados *estomas*, que les permiten el intercambio gaseoso normal de la fotosíntesis y la transpiración. El ozono reacciona de forma instantánea con las estructuras celulares y provoca la formación de compuestos denominados *especies reactivas de oxígeno* (o ROS, por su sigla en inglés) las cuales, si llegan al núcleo de las células, alteran la información genética y, por ende, los mecanismos de la planta que producen proteínas.

Las plantas contrarrestan estos efectos mediante la generación de compuestos antioxidantes, pero cuando la cantidad de especies reactivas es mayor que la que la planta puede neutralizar, se produce *estrés oxidativo*. En esas condiciones, las plantas reducen su tasa de fotosíntesis y, por lo tanto, su crecimiento, y suelen aparecer zonas



mueras en las hojas, enrollamiento de las puntas, menor calidad nutritiva y raíces de menor tamaño.

El ozono, además, afecta a organismos que se relacionan con las plantas. Durante la última década, los autores hemos investigado el efecto del ozono sobre las plagas y enfermedades de los cultivos, así como sobre hongos y bacterias benéficas para estos. Mediante cámaras de cultivo que permiten modificar la concentración de ozono del aire, analizamos los efectos directos e indirectos del ozono sobre pulgones, insectos muy abundantes que constituyen una de las principales plagas de los cultivos.

Los efectos directos son consecuencia de la exposición de los insectos al ozono, mientras que los indirectos ocurren debido a las modificaciones generadas por este en las plantas.

La distribución de los pulgones en una planta y entre plantas vecinas depende de la mayor o menor calidad nutricional de ellas y de la presencia de enemigos naturales. En la naturaleza esos insectos normalmente viven y se multiplican en lugares con vegetación variada (que llamamos hábitats fragmentados). Si la vegetación de un lugar cambia en un sentido que no les resulta propicio, la tasa de crecimiento de su población disminuye. En un



Arriba. Hojas de papa con daño moderado. Foto Danica Lombardozi, National Center for Atmospheric Research.

Abajo. Una colonia de pulgones de cereal de la especie *Rhopalosiphum padi* en plantas de raigrás anual (*Lolium multiflorum*), de las que se alimentan succionando savia con sus estiletes bucales.

hábitat continuo con plantas que les brindan buena nutrición, como son muchos campos cultivados, las poblaciones de insectos crecen rápidamente, al punto que con frecuencia se producen epidemias, lo cual reduce el crecimiento de los cultivos.

En nuestros experimentos, en los que simulamos hábitats con distintas concentraciones de ozono y de pulgones, encontramos que a mayor concentración del gas, menor dispersión de los insectos. Esto permitiría predecir que el aumento de la contaminación del aire por ozono disminuiría el daño ocasionado por los pulgones y por las enfermedades virales que transmiten con su saliva.

La exposición de las plantas al ataque de herbívoros (o herbivoría), que constituye para ellas un factor de estrés, modifica su comportamiento ante la acción posterior de otro agente estresante. Esta sensibilización se conoce como *respuesta inducida*, y frecuentemente implica la producción de especies reactivas de oxígeno por las plantas, activada por la saliva de los herbívoros. Esas especies a su vez provocan la generación de hormonas que defienden a las plantas de los propios insectos y de antioxidantes que, si bien neutralizan las especies reactivas, pueden disminuir las defensas de las plantas ante nuevos ataques de insectos.

Estas respuestas no solo se activan ante el ataque de insectos sino, también, ante la exposición a concentraciones elevadas de ozono. En otras palabras, esta exposi-

ción puede, por así decirlo, confundir a la planta y llevarla a generar respuestas defensivas contra los herbívoros.

En un estudio acerca de las respuestas al ozono y a bacterias causantes de enfermedades en plantas de tomate encontramos dos resultados interesantes. Por un lado, las variedades de tomate genéticamente más sensibles al ozono resultaron menos sensibles a dichas bacterias, y viceversa. Pero cuando expusimos plantas de tomate a concentraciones elevadas de ozono y luego las infectamos con las bacterias, constatamos que las variedades genéticamente más sensibles al ozono enfermaron más que las genéticamente menos sensibles al gas. Es decir, las plantas más tolerantes al ozono tienen también mayor capacidad de tolerar las enfermedades en un ambiente con concentraciones elevadas del gas.

Por su parte, las plantas establecen relaciones estrechas, denominadas simbiosis, con hongos y bacterias que no las enferman sino que favorecen su crecimiento. Hemos observado que plantas de soja que obtienen nitrógeno de la atmósfera mediante relaciones simbióticas con bacterias del género *Rhizobium* reducen la cantidad de nitrógeno así obtenido y fijado en sus tejidos cuando son expuestas a concentraciones elevadas de ozono.

De la misma manera, el ozono puede afectar las simbiosis benéficas de las plantas con hongos. Es el caso de los hongos que se establecen en las raíces del poroto o del trigo y que favorecen la absorción de nutrientes por

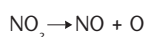


Izquierda. Pulgones (posiblemente *Uroleucon sp.*) sobre un tallo de vara de oro (*Solidago sp.*), planta americana con vistosas flores amarillas. **Derecha.** El daño causado por el ozono se advierte inicialmente por el punteado en la parte izquierda de esta hoja de poroto. Las manchas amarillentas con bordes amarillentos en el centro y la parte superior de la foto indican daños más severos. Foto Danica Lombardozi, National Center for Atmospheric Research.

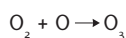
NIEBLA FOTOQUÍMICA

La niebla fotoquímica, normalmente conocida como *smog fotoquímico*, que lleva varias décadas originando problemas respiratorios a los habitantes de distintos países, puede producir también daños graves a las plantas. El ozono es su componente más importante. Para su formación en la atmósfera son esenciales elevadas temperaturas del aire y radiación intensa.

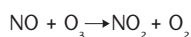
El ozono es una molécula muy inestable que se forma y se destruye en un ciclo de reacciones que incluyen óxidos de nitrógeno. Ese ciclo se inicia con la rotura de las moléculas de dióxido de nitrógeno (NO₂) atmosférico por efecto de la radiación solar, una reacción que da lugar a óxido nítrico (NO) y un átomo de oxígeno, y se escribe en símbolos así:



De inmediato, el átomo de oxígeno se combina con el oxígeno molecular del aire (O₂) y origina una molécula de ozono:



Pero el ozono es muy inestable y, en presencia de óxido nítrico (NO), rápidamente reconstituye el dióxido de nitrógeno (NO₂) y libera oxígeno molecular:



Así se establece un equilibrio entre la formación y destrucción de ozono, y su concentración se mantiene constante. Pero alrededor de los centros urbanos, los motores de automóviles y la actividad fabril producen un aumento significativo del NO en la atmósfera, a la que además agregan hidrocarburos volátiles, conocidos como *compuestos orgánicos volátiles* (VOC, por su sigla en inglés). La oxidación de los últimos genera compuestos químicos conocidos como *radicales libres*, capaces de convertir NO en dióxido de nitrógeno (NO₂) sin que se rompa la molécula

de ozono (O₃). Como resultado, esos compuestos orgánicos volátiles obstaculizan la desintegración natural del ozono descrita, lo que desemboca en elevadas concentraciones locales de ozono.

Las medidas para reducir la incidencia y gravedad del ozono pueden tener un efecto opuesto al esperado si no se conoce su proceso de formación y destrucción. En entornos urbanos contaminados, el NO emitido por fábricas o automóviles puede combinarse de inmediato con el ozono, lo que reduce la concentración de este en la atmósfera, pero esa concentración puede incrementarse con la emisión a la atmósfera de los citados compuestos orgánicos volátiles. Es decir, una reducción de las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NO y NO₂, genéricamente simbolizados por NO_x) puede dar lugar a un aumento de las concentraciones de ozono en las ciudades si no se controla también las emisiones de compuestos orgánicos volátiles.



Plantas de trébol (*Trifolium repens*) que fueron expuestas a ozono y, como consecuencia, sufrieron la muerte de tejidos, como lo indican las manchas blancas que se advierten en las hojas.

ellas, particularmente de fósforo. En nuestros experimentos encontramos que la exposición de esas plantas al ozono reduce el beneficio de esta simbiosis.

Hay otros hongos benéficos que se alojan en los órganos aéreos de algunas gramíneas y les confieren mayor tolerancia al estrés producido por insectos herbívoros o por sequía. Encontramos una menor susceptibilidad al ozono en las plantas con esos hongos, pero su exposición a concentraciones elevadas del gas reduce la supervivencia del hongo en sus semillas. Observamos que si bien el ozono aumenta la acumulación de antioxidantes en sus semillas libres del hongo

y les confiere mayor longevidad, esto no ocurre en las semillas que contienen el hongo. De manera análoga, hemos comprobado que la mayor tolerancia del estrés causado por ataques de insectos herbívoros conferido por la presencia del hongo queda debilitada cuando las plantas crecen bajo concentraciones elevadas de ozono.

En resumen, el aumento de concentración de ozono en la tropósfera no solo genera efectos adversos directos en las plantas sino, también, conlleva consecuencias, dañinas o benéficas según el caso, en los distintos tipos de organismos que interactúan con ellas.


Perspectivas futuras

En la mayoría de los países europeos, la concentración máxima de ozono establecida como límite para la protección de la salud humana, la vegetación y los ecosistemas (alrededor de 40ppb) resulta superada con frecuencia, lo que causa unos 700 ingresos anuales de personas en los hospitales. Aproximadamente 330 millones de europeos podrían estar expuestos, por lo menos una vez por año, a un episodio en el que la concentración de ozono supera ese límite. La tendencia en otras regiones del mundo, incluidas Asia y las Américas, donde las emisiones de los más importantes gases precursores de ozono han aumentado en forma sostenida, no es muy distinta.


El logro del objetivo de no exceder el nivel máximo indicado de ozono exige limitar el crecimiento de las emisiones de los gases precursores no solo en el hemisferio norte, sino en todo el planeta. Hacerlo, sin embargo, es difícil y hasta en algunos casos imposible. Se ha estimado que si se cumplieran los objetivos para control de emisiones de óxidos de nitrógeno establecidos por convenios internacionales, las concentraciones máximas de ozono se reducirían entre 5% y 10%. Es decir, la acción del ozono sobre la producción de alimentos tiene que ser considerada como un componente importante

del cambio global, especialmente en regiones con rápido crecimiento económico. Pero nuestro conocimiento de esa acción y sus consecuencias en dichas regiones es muy limitado.

Debido a que los episodios de alta concentración de ozono probablemente también acontecen en la Argentina, es importante realizar mediciones sistemáticas de esa concentración en áreas cercanas a las grandes urbes a las que lo puedan llevar los vientos prevalentes, para evaluar en qué medida esa contaminación puede actuar sobre los cultivos y dar resultados perjudiciales o benéficos según sean las múltiples interacciones que establecen entre ellos y con otros factores físicos del ambiente.

La ciencia tiene el cometido esencial de encontrar respuestas a las numerosas incógnitas planteadas. Los esfuerzos por producir o seleccionar cultivares tolerantes a plagas, enfermedades y sequías necesita extenderse a la tolerancia a mayores concentraciones de ozono. También es necesario que la ciencia considere los efectos del ozono sobre la salud humana. Por su lado, la sociedad necesita que el control de la contaminación atmosférica con ozono se incorpore al marco regulatorio del país respectivo, y que esto se haga en conocimiento de que el cambio climático hará más difícil tomar medidas que reduzcan esa contaminación, debido a que las condiciones meteorológicas serán cada vez más propicias a su formación en la atmósfera. 

LECTURAS SUGERIDAS



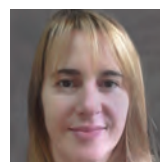
AAVV, 2016, *The Impacts of Climate Change on Human Health in the United States. A scientific assessment*, US Global Change Research Program. accesible en <https://health2016.globalchange.gov/>.

MARSHALL F, ASHMORE M & HINCHCLIFFE F, 1997, *A Hidden Threat to Food Production. Air pollution and agriculture in the developing world*, International Institute for Environment and Development, Sustainable Agriculture and Rural Livelihoods Programme.



María Alejandra Martínez-Ghersa

Doctora en ciencias ambientales, Oregon State University.
Profesora adjunta, UBA.
Investigadora independiente del Conicet en el IFEVA.
martinez@agro.uba.ar



Analía I Menéndez

Doctora en ciencias agropecuarias, UBA.
Jefa de trabajos prácticos, UBA.
analiam@agro.uba.ar



Pedro E Gundel

Doctor en ciencias agropecuarias, UBA.
Jefe de trabajos prácticos, UBA.
Investigador adjunto del Conicet en el IFEVA.
gundel@agro.uba.ar