



Destrucción del ozono estratosférico: el papel del hierro en las cenizas volantes de carbón aerosolizadas

Mark Whiteside, M.D., M.P.H.

Florida Department of Health, Key West, FL 33040 USA

J. Marvin Herndon, Ph.D.

Transdyne Corporation, San Diego, CA 92131 USA

RESUMEN

En el [European Journal of Applied Sciences, 2022, 10(3), 586-603], aportamos pruebas convincentes de que la causa principal de la destrucción del ozono estratosférico son las partículas de cenizas volantes de carbón aerosolizadas, y no los clorofluorocarbonos (CFC). Aquí dirigimos nuestra atención al hierro, uno de los elementos más reactivos en las cenizas volantes de carbón que destruyen el ozono. El hierro en los aerosoles primarios y secundarios desempeña un papel crucial en la formación de cristales de hielo en los cirros y en las nubes polares estratosféricas, que participan en la formación del agujero de ozono. El hierro está asociado a especies reactivas de oxígeno, como el radical hidroxilo (OH) que destruye el ozono en la estratosfera. Se sabe que el hierro activa los halógenos, incluidos el cloro, el bromo y el yodo. El ozono se destruye por adsorción en las partículas que contienen hierro y por reacciones fotoquímicas con otros componentes de las cenizas volantes de carbón. La incapacidad de la comunidad científica para salir del paradigma de los CFC y abordar la verdadera causa del agotamiento del ozono estratosférico tiene graves consecuencias. Hoy nos enfrentamos a un futuro trágico, con niveles de ozono estratosférico gravemente reducidos y a la devastación de la mortífera radiación ultravioleta. Por ello, deberá limitarse o ponerse fin a toda actividad con aerosoles de cenizas volantes de carbón; empezando por la dispersión deliberada, encubierta y casi global de partículas de cenizas volantes de carbón en la troposfera superior.

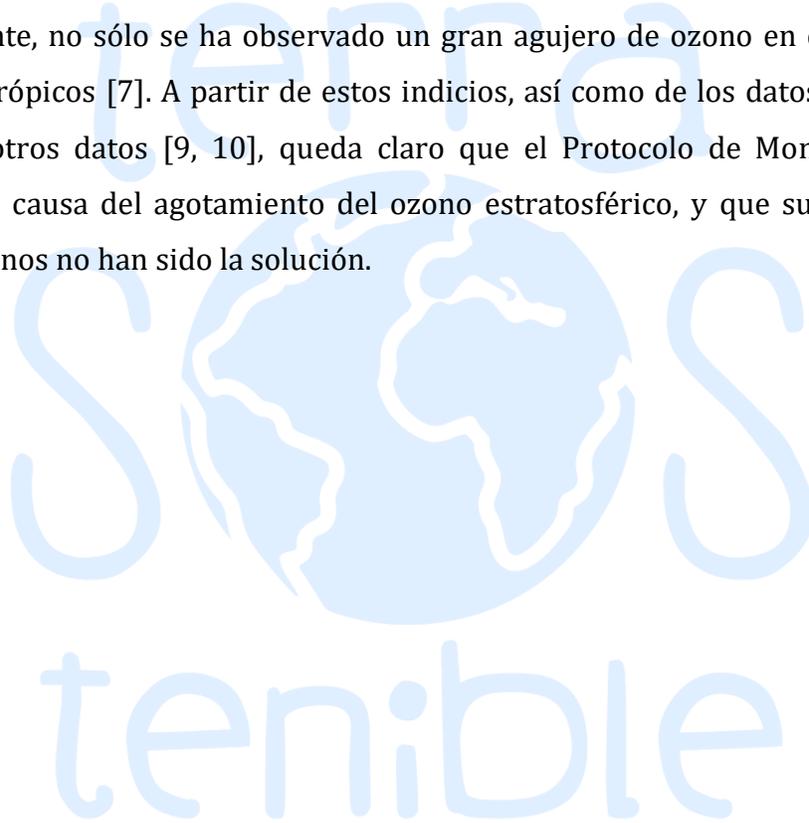
Palabras clave: Agujero de ozono, Geoingeniería, fumigaciones aéreas, estelas de geoingeniería, Troposfera, calentamiento global, radiación ultravioleta

EMPEORAMIENTO DE LA DESTRUCCIÓN DEL OZONO ESTRATOSFÉRICO

La narrativa oficial de la "*recuperación gradual del ozono*" debido al Protocolo de Montreal, que condujo a la eliminación gradual y posterior prohibición de los clorofluorocarbonos (CFC), es irreal. Lo cierto es que el ozono estratosférico sigue disminuyendo, y los científicos atmosféricos no saben o no quieren decir cuán dañada está la capa de ozono. Los científicos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) admitieron en 2018 que el ozono estratosférico inferior había disminuido, lo que incidía en la recuperación general de la capa de ozono. Afirmaron que desconocían las causas de este agotamiento y subrayaron que "*es necesario establecer urgentemente las causas*" [1]. Otros han atribuido ese agotamiento a sustancias de vida corta que contienen cloro o bromo [2]. Dos de los mayores agujeros de ozono en la Antártida de los que se tiene constancia se produjeron en 2020 y 2021. Sugiriéndose como causas probables, el cambio climático, la actividad volcánica y los incendios forestales [3].

El agotamiento del ozono estratosférico sobre el continente euroasiático se atribuye a un cambio en el vórtice polar [4].

El rápido aumento de la penetración de las radiaciones ultravioletas B y C en la superficie de la Tierra presagia un agotamiento potencialmente grave del ozono estratosférico. Los efectos destructivos claramente visibles de los rayos ultravioleta en los ecosistemas globales, incluidos los bosques y los arrecifes de coral, deberían ser una señal de advertencia de que el agotamiento del ozono estratosférico puede ser la amenaza más inminente para la biosfera [5]. Recientemente, no sólo se ha observado un gran agujero de ozono en el Ártico [6], sino también en los trópicos [7]. A partir de estos indicios, así como de los datos mostrados en la Figura 1 [8] y otros datos [9, 10], queda claro que el Protocolo de Montreal diagnosticó erróneamente la causa del agotamiento del ozono estratosférico, y que sus sanciones a los clorofluorocarbonos no han sido la solución.



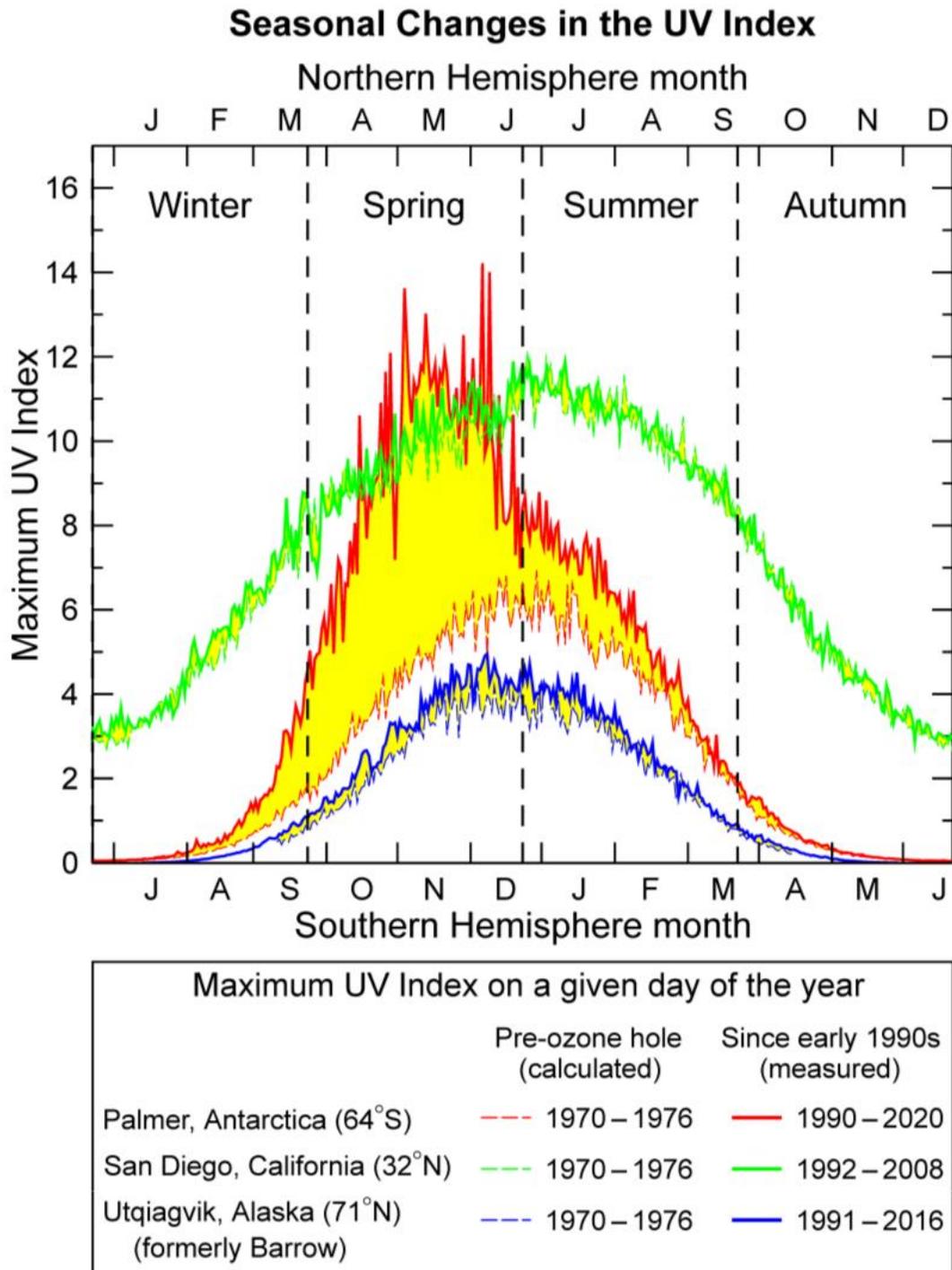


Figura 1. Estado actual e histórico del ozono estratosférico revelado por las mediciones del índice UV que ilustran el empeoramiento del agujero de ozono Antártico. De [8]
 Recientemente hemos publicado pruebas contundentes de que la principal causa del agotamiento del ozono estratosférico [11] son las partículas de cenizas volantes de carbón aerosolizadas, producto de desecho tóxico de la combustión de carbón, y no los clorofluorocarbonos (CFC), como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.

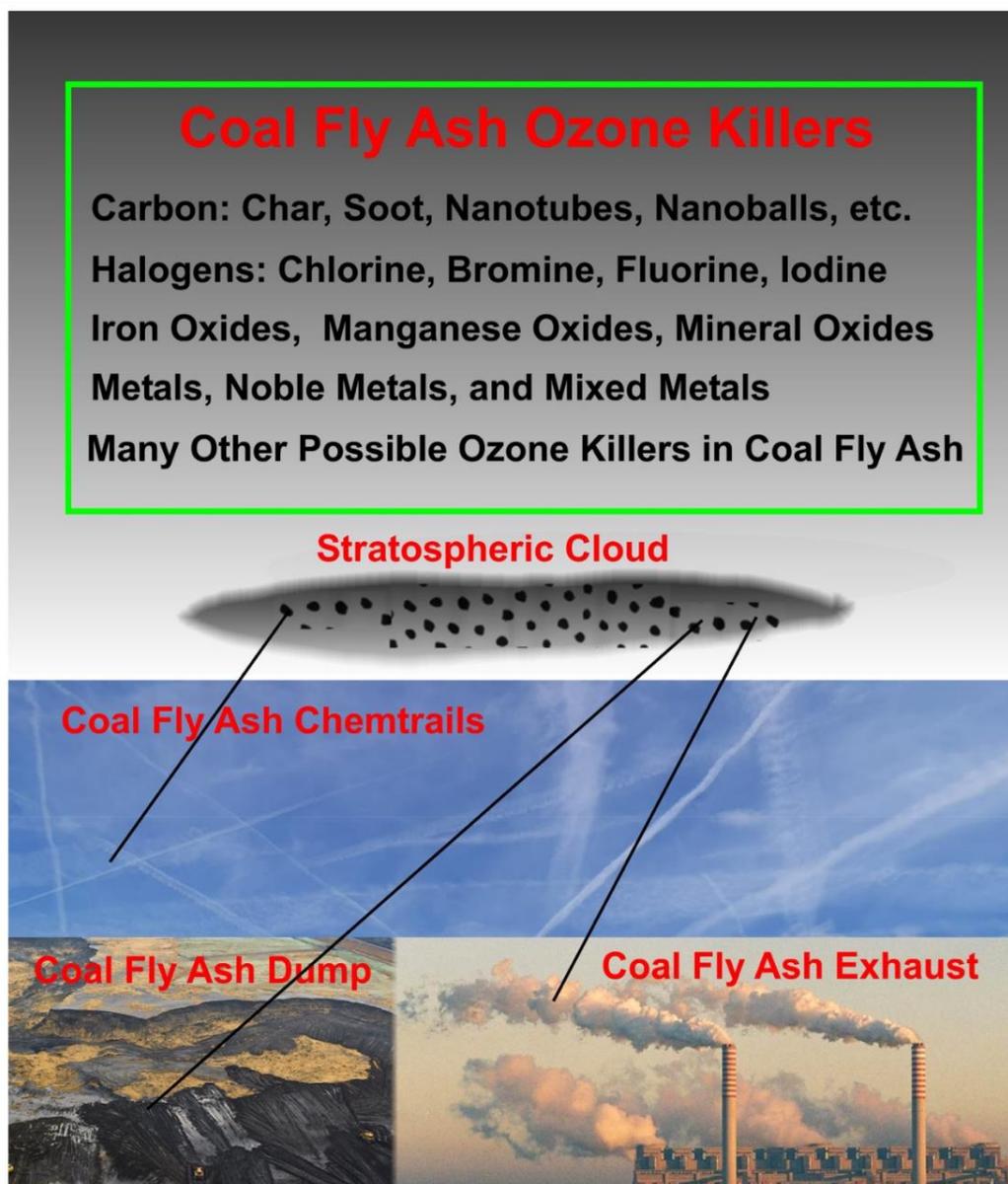


Figura 2. Ilustración de las principales fuentes de cenizas volantes de carbón aerosolizadas en una nube polar estratosférica cargada de partículas, y algunos de los muchos componentes de las cenizas volantes de carbón que destruyen directamente el ozono [11, 12].

CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN AEROSOLIZADAS

Las partículas de cenizas volantes de carbón aerosolizadas son eficaces nucleadores de hielo en las nubes de gran altitud. Los cirros estratosféricos se nuclean en torno al polvo mineral y a los óxidos metálicos, y las cenizas volantes de carbón contribuyen de forma importante a ambas categorías [13]. En la troposfera, las partículas de aerosoles antropogénicos, especialmente las cenizas volantes, los metales y las partículas de hollín, se incorporan a las gotas de las nubes y, posteriormente, se transportan a grandes distancias para afectar a los ecosistemas globales, a la salud humana y al equilibrio térmico atmosférico [14]. La convección profunda y el afloramiento de cirros ofrecen un mecanismo de transporte de la troposfera a la estratosfera [15, 16]. La composición química, el tamaño y la morfología de las partículas refractarias recogidas en las nubes de la estratosfera polar

son consistentes con las encontradas en las cenizas volantes de carbón. Estas partículas incluyen las que contienen carbono, silicatos, hierro y mezclas complejas de metales [17]. La evidencia sugiere que las nubes estratosféricas capturan y concentran las partículas de las cenizas volantes de carbón [11]. En primavera, cuando las nubes estratosféricas comienzan a derretirse/evaporarse, estas partículas se liberan, reaccionan con el ozono estratosférico y lo destruyen [11].

Las cenizas volantes de carbón se forman en un entorno químico no natural y anhidro en los gases calientes por encima de la caldera de combustión, lo que hace que su comportamiento químico sea muy diferente al de las partículas de tamaño similar de la corteza terrestre. Al menos 39 elementos de las cenizas volantes de carbón pueden ser lixiviados o parcialmente extraídos por el agua [18]. Los elementos primarios en las cenizas volantes de carbón incluyen óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio, con cantidades menores de magnesio, azufre, sodio, cloro y potasio. El carbono suele estar presente en su forma elemental como carbón, hollín, esferas nanométricas y nanotubos [19, 20]. Entre los numerosos oligoelementos presentes en las cenizas volantes de carbón encontramos arsénico, bario, cromo, cobre, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio, estroncio, talio, vanadio y zinc [21].

Las propias cenizas volantes de carbón pueden destruir el ozono [22-27]. El ozono estratosférico puede ser destruido por halógenos reactivos, y el cloro, el bromo, el flúor y el yodo se encuentran en las cenizas volantes de carbón [28]. Irónicamente, la combustión del carbón produce incluso algunos clorofluorocarbonos que se encuentran en las cenizas volantes de carbón [29]. Los datos experimentales demuestran que algunos componentes de las cenizas volantes de carbón pueden absorber o destruir el ozono. En efecto, se produce una absorción reactiva del ozono en los óxidos minerales, incluidos los de aluminio, silicio y hierro, todos ellos componentes principales de las cenizas volantes de carbón [30]. Las superficies de las cenizas volantes de carbón son oxidadas por el ozono [24], y el ozono reacciona con las nanopartículas de carbono [25-27]. Se ha comprobado que las partículas de aerosol de carbono y hierro submicrónicas destruyen el ozono de forma eficiente, lo que implica que estas partículas en la estratosfera pueden representar una causa importante de la reducción del ozono [31].

EL HIERRO EN LAS CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN AEROSOLIZADAS

Las cenizas volantes de carbón son una gran fuente de hierro atmosférico, con importantes implicaciones para el clima y los ciclos biogeoquímicos globales. El hierro es un elemento primario en las cenizas volantes de carbón y está contenido tanto en la fase de vidrio de aluminosilicato como en las fases minerales de óxido, incluyendo tanto la magnetita (Fe_3O_4) como la hematita (Fe_2O_3) [32]. La especiación del hierro mediante espectroscopia Mossbauer indica que el hierro férrico en la fase de vidrio de aluminosilicato es la fuente de hierro biodisponible en las cenizas volantes de carbón: esta especie de hierro está asociada a las partículas de combustión y no al polvo de la corteza terrestre derivado de los minerales del suelo [33]. Los ácidos formados a partir de contaminantes gaseosos antropogénicos como el dióxido de azufre y los óxidos nitrosos disuelven el hierro en las partículas aerosolizadas, aumentando en gran medida la cantidad de formas de hierro biodisponibles para el océano [34] y, presumiblemente de forma similar, haciendo que el hierro esté más disponible para reaccionar con el ozono estratosférico.

El procesamiento atmosférico de los aerosoles de cenizas volantes de carbón aumenta la solubilidad del hierro debido a los cambios en la morfología del vidrio de aluminosilicato. En consecuencia, el hierro se libera continuamente en la solución acuosa a medida que las partículas de cenizas volantes de carbón se rompen en fragmentos más pequeños [35]. Estudios recientes sugieren que la carga atmosférica de hierro procedente de la combustión antropogénica (de combustibles fósiles) es mucho mayor de lo que se había calculado anteriormente, y supera a la de las fuentes de polvo y de quema de biomasa. El hierro desempeña un papel clave en los aerosoles atmosféricos, incluyendo la retención del calor en la superficie [36], la biogeoquímica de los océanos [37], el ciclo global del carbono y los efectos de la nieve/hielo y el albedo [38].

El hierro reactivo en los aerosoles de cenizas volantes de carbón en la atmósfera superior tiene el potencial de agotar el ozono estratosférico por varios mecanismos diferentes que se abordan aquí.

Anteriormente, el origen de los iones metálicos en la ionosfera superior/inferior se atribuía a la evaporación de pequeños micrometeoros que cruzan la órbita de la Tierra, no a las cenizas volantes de carbón [39]. Las nubes mesosféricas polares, también conocidas como nubes noctilucentes, son finas capas de partículas de hielo que se producen entre 82 y 87 km en la mesosfera de verano de alta latitud. Las mediciones Lidar, que utilizan longitudes de onda espectrales de hierro de 372 y 374 nm, muestran que estas nubes se solapan en altitud con una capa de hierro, que absorben [40]. Estos resultados confirman nuestra sugerencia de que las partículas de cenizas volantes de carbón (no sólo el hierro metálico), propulsadas a la estratosfera, no sólo sirven como agentes nucleadores de hielo, sino que son atrapadas por las nubes, incluidas las nubes estratosféricas polares. En primavera, las nubes estratosféricas heladas se derriten/evaporan liberando sus partículas de cenizas volantes de carbón atrapadas, y haciendo que esas partículas consumidoras de ozono estén fácilmente disponibles para la destrucción-reacción con el ozono estratosférico ambiental [11].

Se cree que el material refractario insoluble, en forma de aerosoles primarios y secundarios, juega un papel catalítico crucial en la activación de los cristales de hielo en los cirros de la troposfera y en las nubes polares estratosféricas, estas últimas asociadas a la destrucción del ozono [41]. Se ha demostrado que los análogos de las partículas "meteóricas" refractarias, que contienen hierro, silicio y magnesio, pueden nuclear el hielo y los hidratos de ácido nítrico en las nubes estratosféricas polares [41, 42]. Los metales meteóricos, hasta cierto punto una metáfora de las partículas de cenizas volantes de carbón, son reconocidos como importantes componentes de aerosoles en las zonas mesosférica, troposférica y estratosférica inferior. Estos aerosoles suelen proceder de fuentes antropogénicas, terrestres y marinas [43]. El transporte de aire de la troposfera a la estratosfera ocurre principalmente en los trópicos, y está asociado con la rama ascendente de la circulación Brewer-Dobson. La convección atmosférica profunda [44], incluida la circulación monzónica, proporciona una vía eficaz para que la contaminación por cenizas volantes de carbón del continente asiático entre en la estratosfera global [45].

El óxido de hierro en los aerosoles puede absorber químicamente el dióxido de azufre, convirtiéndolo en sulfato en la interfaz gas-sólido. El recubrimiento superficial de las partículas insolubles de los aerosoles con materiales solubles aumenta su capacidad de nucleación de nubes [46]. Un aumento de las especies secundarias a través del procesamiento de las nubes incrementa la biodisponibilidad del hierro en los aerosoles y, por consiguiente, aumenta su capacidad de destrucción del ozono estratosférico.

En un estudio sobre las especies secundarias en los residuos de las nubes (gotas secas de las nubes) en la cima de una montaña en China, las partículas ricas en hierro procedentes de fuentes de combustión, a diferencia de las partículas de polvo, aportaron la mayor parte de los residuos de las nubes que contenían hierro. Más del 90% de las partículas ya contenían sulfatos antes de los eventos nubosos. El procesamiento de las nubes dio lugar a una mayor fracción de nitrato, cloruro y oxalato en los residuos de las nubes que contenían hierro [47]. El hierro se moviliza en ambientes atmosféricos ácidos, tanto antes como durante la deposición de aerosoles. Las cenizas volantes de carbón interactúan con la capa deliquescente altamente ácida que se forma alrededor de sus partículas por la absorción de agua y gases atmosféricos ácidos ($\text{pH} < 4$). El procesamiento atmosférico disuelve el hierro en los aerosoles mediante mecanismos mediados por protones y procesos de quelación. En suspensiones de ácido clorhídrico a bajo pH, se liberan fracciones significativas de hierro en fase acuosa (Fe^{2+}) de las cenizas volantes de carbón. En las suspensiones de ácido nítrico, una reacción redox superficial suprime la movilidad del Fe^{2+} , dando lugar a la formación de nitritos. En presencia de la radiación solar, los procesos atmosféricos aumentan la formación de Fe^{2+} y ácido nitroso a partir de las partículas de la combustión [48].

Las cenizas volantes de carbón sin procesar muestran una fuerte actividad de nucleación de hielo heterogénea a temperaturas inferiores a 235° K en el modo de deposición y/o condensación y congelación de poros. En contraste con los aerosoles orgánicos atmosféricos, las cenizas volantes de carbón muestran una disminución de la actividad de nucleación de hielo después de su procesamiento en nubes mixtas y de tipo cirro [49].

El radical hidroxilo (OH) es el oxidante más importante en la troposfera, oxidando los hidrocarburos naturales y antropogénicos y produciendo ozono de tipo contaminante. Sin embargo, en la estratosfera y la mesosfera, el OH es un catalizador clave para la destrucción del ozono [50]. Los aerosoles orgánicos secundarios generados en el ambiente y en el laboratorio forman cantidades significativas de OH en el agua de las nubes, lo que puede explicarse por la descomposición de los hidroperóxidos orgánicos. La reactividad química y el envejecimiento de las partículas de aerosol orgánico secundario (incluidas las de las cenizas volantes de carbón) se ven muy potenciados por el hierro, que produce OH por la química de Fenton entre el hierro ferroso (Fe^{2+}) y el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) [51], presumiblemente producido por el ozono, O_3 [52]. El hierro atmosférico, como especie dominante de los metales de transición en la atmósfera, se asocia a la generación de OH radical en los extractos de partículas ambientales, especialmente los procedentes de fuentes antropogénicas. [53]. Los aerosoles de cenizas volantes de carbón son una fuente importante de OH en presencia de un donante de electrones añadido (ozono) o de H_2O_2 [54]. En las gotas de las nubes, la reacción "foto-Fenton" se produce por la rápida fotorreducción de Fe^{3+} a Fe^{2+} , que a su vez apoya la clásica reacción de Fenton, es decir, $\text{Fe}(\text{II}) + \text{H}_2\text{O}_2$ (presumiblemente producido por el ozono) da lugar a $\text{Fe}(\text{III})$, OH y OH^- [55]. Recientemente se ha descubierto que durante los primeros minutos que siguen a la formación de las gotas de las nubes, el material de los aerosoles produce un "estallido" de radicales hidroxilo dependiente de la luz y cercano a los rayos UV, que es hasta cinco veces mayor de lo que se conocía hasta ahora. La fuente de este estallido es una química previamente no reconocida entre el hierro ferroso y los perácidos [56].

Los átomos de cloro consumen compuestos orgánicos volátiles e influyen en los ciclos del ozono (O_3) y los óxidos de nitrógeno (NO_x). Además de las reacciones heterogéneas, las reacciones fotoquímicas en las que intervienen el HNO_3 y el H_2O_2 acuosos sobre y dentro de la superficie de las nubes polares estratosféricas podrían ser otra importante vía de activación de halógenos de las cenizas volantes de carbón para la destrucción del ozono

[57]. La liberación de partículas reactivas de hierro con la activación asociada de halógenos a partir de las nubes de hielo polar que se descongelan en primavera puede explicar otro mecanismo por el que los componentes de las cenizas volantes de carbón destruyen el ozono, produciendo agujeros de ozono durante este periodo.

La reciente detección de yodo en la estratosfera se supone que proviene de las emisiones oceánicas [58]. Discrepamos sobre que la supuesta fuente sean únicamente las emisiones oceánicas. Las cenizas volantes de carbón aerosolizadas procedentes de fuentes industriales contaminantes y dispersadas por aviones en la troposfera superior, que se elevan además a la estratosfera, contaminan la atmósfera con yodo, otros halógenos y otros elementos, incluido el mercurio [59-61]. Las restricciones a la producción y eliminación del mercurio no han disminuido su presencia en la atmósfera [59]. No es sorprendente que, como muchos de los otros componentes de las cenizas volantes de carbón, el mercurio reaccione con el ozono y lo destruya [62-64].

Los aerosoles de las cenizas volantes de carbón, especialmente los depositados en la alta atmósfera, no sólo explican la composición química de una gran parte de las partículas estratosféricas, sino que proporcionan numerosas vías de reacción, verificadas experimentalmente, para acabar con el ozono estratosférico, incluyendo, entre otras, las complejas reacciones de los halógenos que contribuyen al agotamiento del ozono estratosférico.

En muchos casos, el metal de hierro y los compuestos de hierro no sólo eliminan el ozono directamente, sino que facilitan otras reacciones destructoras del ozono, lo que apoya aún más nuestra afirmación, basada en pruebas, de que son las cenizas volantes de carbón aerosolizadas el principal responsable de la destrucción del ozono estratosférico [11].

CONCLUSIONES

El ozono estratosférico es el protector solar natural de la Tierra, que bloquea la mayor parte de la radiación ultravioleta más dañina del Sol y protege todas las formas de vida superiores de la Tierra. El Protocolo de Montreal, elaborado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, entró en vigor en 1989. Este acuerdo internacional se basó en lo que podría llamarse la "ciencia del consenso", culpando a los clorofluorocarbonos (CFC) del agotamiento del ozono estratosférico. Desde entonces, el Protocolo de Montreal ha sido aclamado como un gran éxito, ya que no sólo ha impedido que se siga dañando la capa de ozono, sino que ha mejorado el cambio climático. Sin embargo, la realidad es que el mundo supuestamente evitado por el Protocolo de Montreal ya está aquí, con un agravamiento constante del agotamiento de la capa de ozono y la penetración de los mortíferos rayos ultravioleta B y C en la superficie de la Tierra. Basta con salir a la calle y sentir cómo el sol quema la piel y ver los signos de destrucción de los rayos UV en todos los árboles. Hemos aportado pruebas adicionales de que la principal causa de la destrucción del ozono estratosférico son las cenizas volantes de carbón, y no los CFC. Las propias cenizas volantes de carbón y los múltiples elementos y compuestos que contienen pueden absorber o destruir el ozono. Aquí nos centramos en el hierro, un elemento abundante en las cenizas volantes de carbón que puede tanto destruir el ozono como interactuar con múltiples elementos, incluyendo todos los halógenos, para agotar el ozono en la estratosfera. La incapacidad (o la falta de voluntad) de la comunidad científica para salir del paradigma de la destrucción del ozono por los CFC y abordar la verdadera causa del agotamiento del ozono estratosférico supondrá un error letal para la humanidad. En consecuencia deben reducirse o eliminarse de inmediato todas las fuentes de cenizas volantes de carbón aerosolizadas, muy en particular la dispersión aérea de las mismas en la atmósfera superior, llevada a cabo de forma deliberada, encubierta, y casi global. Mientras la población no "despierte" al daño inimaginable que este tipo de manipulación tecnológica provoca en nuestro planeta, continuará avanzando a velocidad de vértigo la actual "Sexta Gran Extinción" antropogénica.

Referencias

1. Ball, W.T., et al., Evidence for a continuous decline in lower stratospheric ozone offsetting ozone layer recovery. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018. 18(2): p. 1379-1394.
2. Hossaini, R., et al. Ozone Destruction in the Upper Troposphere/Lower Stratosphere from Short-Lived Halogens and Climate Impacts. in *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2014.
3. Yook, S., D.W.J. Thompson, and S. Solomon, Climate Impacts and Potential Drivers of the Unprecedented Antarctic Ozone Holes of 2020 and 2021. *Geophysical Research Letters*, 2022. 49(10): p. e2022GL098064.
4. Zhang, J., et al., Stratospheric ozone loss over the Eurasian continent induced by the polar vortex shift. *Nat Commun*, 2018. 9(1): p. 206.
5. Herndon, J.M., R.D. Hoisington, and M. Whiteside, Deadly ultraviolet UV-C and UV-B penetration to Earth's surface: Human and environmental health implications. *J. Geog. Environ. Earth Sci. Intn.*, 2018. 14(2): p. 1-11.
6. Witze, A., Rare ozone hole opens over Arctic--and it's big. *Nature*, 2020. 580(7801): p. 18-20.
7. Lu, Q.-B., Observation of large and all-season ozone losses over the tropics. *AIP Advances*, 2022. 12(7): p. 075006.
8. Bernhard, G.H., et al., Updated analysis of data from Palmer Station, Antarctica (64° S), and San Diego, California (32° N), confirms large effect of the Antarctic ozone hole on UV radiation. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2022. 21(3): p. 373-384
9. Cordero, R.R., et al., Persistent extreme ultraviolet irradiance in Antarctica despite the ozone recovery onset. *Scientific reports*, 2022. 12(1): p. 1-10.
10. Takahashi, T., et al., Measurement of solar UV radiation in antarctica with collagen sheets. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 2012. 11(7): p. 1193-1200.
11. Herndon, J.M. and M. Whiteside, Aerosolized coal fly ash particles, the main cause of stratospheric ozone depletion, not chlorofluorocarbon gases. *European Journal of Applied Sciences*, 2022. 10(3): p. 586-603.
12. Herndon, J.M. and M. Whiteside, *Chemtrails are not Contrails: The Face of Evil 2022*: Amazon Kindle Direct Publishing https://www.amazon.com/dp/B09X49TGWB?ref_=pe_3052080_397514860.
13. Cziczo, D.J., et al., Clarifying the dominant sources and mechanisms of cirrus cloud formation. *Science*, 2013. 340(6138): p. 1320-1324.
14. Liu, L., et al., Cloud scavenging of anthropogenic refractory particles at a mountain site in North China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018. 18(19): p. 14681-14693.
15. de Reus, M., et al., Particle production in the lowermost stratosphere by convective lifting of the tropopause. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999. 104(D19): p. 23935-23940.
16. Corti, T., et al., The impact of cirrus clouds on tropical troposphere-to-stratosphere transport. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006. 6(9): p. 2539-2547.
17. Ebert, M., et al., Chemical analysis of refractory stratospheric aerosol particles collected within the arctic vortex and inside polar stratospheric clouds. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016. 16(13): p. 8405-8421.
18. Moreno, N., et al., Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion fly ashes. *Fuel*, 2005. 84: p. 1351-1363.

- 19.** Das, T., B.K. Saikia, and B.P. Baruah, Formation of carbon nano-balls and carbon nano-tubes from northeast Indian Tertiary coal: value added products from low grade coal. *Gondwana Research*, 2016. 31: p. 295-304.
- 20.** Alam, J., et al., Recent advances in methods for the recovery of carbon nanominerals and polyaromatic hydrocarbons from coal fly ash and their emerging applications. *Crystals*, 2021. 11(2): p. 88.
- 21.** Fisher, G.L., Biomedically relevant chemical and physical properties of coal combustion products. *Environ. Health Persp.*, 1983. 47: p. 189-199.
- 22.** Chen, X., et al. FLY ASH BENEFICATION WITH OZONE: MECHANISM OF ADSORPTION SUPPRESSION. in *ABSTRACTS OF PAPERS OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY*. 2002. AMER CHEMICAL SOC 1155 16TH ST, NW, WASHINGTON, DC 20036 USA.
- 23.** Alebic-Juretic, A., T. Cvitas, and L. Klasinc, Ozone destruction on solid particles. *Environmental monitoring and assessment*, 1997. 44(1): p. 241-247.
- 24.** Pedersen, K.H., et al., Post-treatment of fly ash by ozone in a fixed bed reactor. *Energy & fuels*, 2009. 23(1): p. 280-285.
- 25.** Cataldo, F., Ozone reaction with carbon nanostructures 1: reaction between solid C60 and C70 fullerenes and ozone. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2007. 7(4-5): p. 1439-1445.
- 26.** Cataldo, F., Ozone reaction with carbon nanostructures 2: The reaction of ozone with milled graphite and different carbon black grades. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2007. 7(4-5): p. 1446-1454.
- 27.** Razumovskii, S., et al., Carbon nanostructure reactivity: reactions of graphite powders with ozone. *Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures*, 2007. 15(1): p. 53-63.
- 28.** NRC, Trace-element Geochemistry of Coal Resource Development Related to Environmental Quality and Health 1980: National Academy Press.
- 29.** Jiayi, L., et al., The production and release of CFCs from coal combustion. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 2003. 77(1): p. 81-85.
- 30.** Michel, A., C. Usher, and V. Grassian, Heterogeneous and catalytic uptake of ozone on mineral oxides and dusts: A Knudsen cell investigation. *Geophysical research letters*, 2002. 29(14): p. 10-1-10-4.
- 31.** Fenidel, W., et al., Interaction between carbon or iron aerosol particles and ozone. *Atmospheric Environment*, 1995. 29(9): p. 967-973.
- 32.** Tishmack, J.K. and P.E. Burns, The chemistry and mineralogy of coal and coal combustion products. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004. 236(1): p. 223-246.
- 33.** Veranth, J.M., et al., Mössbauer spectroscopy indicates that iron in an aluminosilicate glass phase is the source of the bioavailable iron from coal fly ash. *Chemical Research in Toxicology*, 2000. 13(3): p. 161-164.
- 34.** Li, W., et al., Air pollution-aerosol interactions produce more bioavailable iron for ocean ecosystems. *Science Advances*, 2017. 3(3): p. e1601749.
- 35.** Chen, H., et al., Coal fly ash as a source of iron in atmospheric dust. *Environmental Science & Technology*, 2012. 46(4): p. 2112-2120.
- 36.** Herndon, J.M. and M. Whiteside, Geophysical consequences of tropospheric particulate heating: Further evidence that anthropogenic global warming is principally caused by particulate pollution. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2019. 22(4): p. 1-23.
- 37.** Whiteside, M. and J.M. Herndon, Role of aerosolized coal fly ash in the global plankton imbalance: Case of Florida's toxic algae crisis. *Asian Journal of Biology*, 2019. 8(2): p. 1-24.
- 38.** Matsui, H., et al., Anthropogenic combustion iron as a complex climate forcer. *Nature communications*, 2018. 9(1): p. 1593.

39. Kopp, E., On the abundance of metal ions in the lower ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997. 102(A5): p. 9667-9674.
40. Plane, J.M., et al., Removal of meteoric iron on polar mesospheric clouds. *Science*, 2004. 304(5669): p. 426-428.
41. Saunders, R., et al., An aerosol chamber investigation of the heterogeneous ice nucleating potential of refractory nanoparticles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010. 10(3): p. 1227-1247.
42. James, A.D., et al., Nucleation of nitric acid hydrates in polar stratospheric clouds by meteoric material. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018. 18(7): p. 4519-4531.
43. Adachi, K., et al., Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy. *Communications Earth & Environment*, 2022. 3(1): p. 1-9.
44. Nielsen, J.K., et al., Solid particles in the tropical lowest stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007. 7(3): p. 685-695.
45. Randel, W.J., et al., Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere. *Science*, 2010. 328(5978): p. 611-613.
46. Kopcewicz, B. and M. Kopcewicz, Iron-containing atmospheric aerosols. *Hyperfine interactions*, 1998. 111(1): p. 179-187.
47. Lin, Q., et al., In-cloud formation of secondary species in iron-containing particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019. 19(2): p. 1195-1206.
48. Kim, D., et al., Atmospheric processing of anthropogenic combustion particles: Effects of acid media and solar flux on the iron mobility from fly ash. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2020. 4(5): p. 750-761.
49. Kilchhofer, K., F. Mahrt, and Z.A. Kanji, The role of cloud processing for the ice nucleating ability of organic aerosol and coal fly ash particles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021. 126(10): p. e2020JD033338.
41. Michel, A., C. Usher, and V. Grassian, Heterogeneous and catalytic uptake of ozone on mineral oxides and dusts: A Knudsen cell investigation. *Geophysical research letters*, 2002. 29(14): p. 10-1-10-4.
42. Fenidel, W., et al., Interaction between carbon or iron aerosol particles and ozone. *Atmospheric Environment*, 1995. 29(9): p. 967-973.
43. Tishmack, J.K. and P.E. Burns, The chemistry and mineralogy of coal and coal combustion products. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004. 236(1): p. 223-246.
44. Veranth, J.M., et al., Mössbauer spectroscopy indicates that iron in an aluminosilicate glass phase is the source of the bioavailable iron from coal fly ash. *Chemical Research in Toxicology*, 2000. 13(3): p. 161-164.
45. Li, W., et al., Air pollution-aerosol interactions produce more bioavailable iron for ocean ecosystems. *Science Advances*, 2017. 3(3): p. e1601749.
46. Chen, H., et al., Coal fly ash as a source of iron in atmospheric dust. *Environmental Science & Technology*, 2012. 46(4): p. 2112-2120.
47. Herndon, J.M. and M. Whiteside, Geophysical consequences of tropospheric particulate heating: Further evidence that anthropogenic global warming is principally caused by particulate pollution. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 2019. 22(4): p. 1-23.
48. Whiteside, M. and J.M. Herndon, Role of aerosolized coal fly ash in the global plankton imbalance: Case of Florida's toxic algae crisis. *Asian Journal of Biology*, 2019. 8(2): p. 1-24.
49. Matsui, H., et al., Anthropogenic combustion iron as a complex climate forcer. *Nature communications*, 2018. 9(1): p. 1593.
50. Kopp, E., On the abundance of metal ions in the lower ionosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997. 102(A5): p. 9667-9674.
51. Plane, J.M., et al., Removal of meteoric iron on polar mesospheric clouds. *Science*, 2004. 304(5669): p. 426-

50. Saunders, R., et al., An aerosol chamber investigation of the heterogeneous ice nucleating potential of refractory nanoparticles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010. 10(3): p. 1227-1247.
51. James, A.D., et al., Nucleation of nitric acid hydrates in polar stratospheric clouds by meteoric material. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018. 18(7): p. 4519-4531.
52. Adachi, K., et al., Meteoritic materials within sulfate aerosol particles in the troposphere are detected with transmission electron microscopy. *Communications Earth & Environment*, 2022. 3(1): p. 1-9.
53. Nielsen, J.K., et al., Solid particles in the tropical lowest stratosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007. 7(3): p. 685-695.
54. Randel, W.J., et al., Asian monsoon transport of pollution to the stratosphere. *Science*, 2010. 328(5978): p. 611-613.
55. Kopcewicz, B. and M. Kopcewicz, Iron-containing atmospheric aerosols. *Hyperfine interactions*, 1998. 111(1): p. 179-187.
56. Lin, Q., et al., In-cloud formation of secondary species in iron-containing particles. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019. 19(2): p. 1195-1206.
57. Kim, D., et al., Atmospheric processing of anthropogenic combustion particles: Effects of acid media and solar flux on the iron mobility from fly ash. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2020. 4(5): p. 750-761.
58. Kilchhofer, K., F. Mahrt, and Z.A. Kanji, The role of cloud processing for the ice nucleating ability of organic aerosol and coal fly ash particles. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021. 126(10): p. e2020JD033338.
59. Herndon, J.M. and M. Whiteside, Contamination of the biosphere with mercury: Another potential consequence of on-going climate manipulation using aerosolized coal fly ash. *J. Geog. Environ. Earth Sci. Intn.*, 2017. 13(1): p. 1-11.
60. Wei, Z., et al., Mobility and contamination assessment of mercury in coal fly ash, atmospheric deposition, and soil collected from Tianjin, China. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2011. 30(9): p. 1997-2003.
61. Sanei, H., S.E. Grasby, and B. Beauchamp, Latest Permian mercury anomalies. *Geology*, 2012. 40(1): p. 63-66.
62. Hall, B., The gas phase oxidation of elemental mercury by ozone, in *Mercury as a Global Pollutant 1995*, Springer. p. 301-315.
63. Wen, Z., et al., Mechanism and kinetic study on elemental mercury oxidation in flue gas by ozone injection. *Ozone: Science & Engineering*, 2018. 40(1): p. 29-36.
64. Saiz-Lopez, A., et al., Boundary layer halogens in coastal Antarctica. *Science*, 2007. 317(5836): p. 348-351.

Traducción: Terra SOS-tenible.
www.guardacielos.org