

## **Mario Molina. El héroe de las ciencias ambientales y el estado actual del agujero de la capa de ozono**

Waldo Quiroz,

*Instituto de Química, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso*

waldo.quiroz@pucv.cl

### **Resumen**

El presente artículo narra sobre la vida y obra de uno de los primeros latinoamericanos en ganar el premio Nobel de Química, específicamente por abordar el problema del agujero en la capa de ozono.

**Palabras clave:** capa de ozono, gases CFC, Mario Molina, Química Ambiental.

### **Introducción**

Son pocos los científicos a los cuales admiro no solo intelectualmente, sino además como personas. Entre la lista de científicos admirables por su aporte no solo científico, sino social, están el gran Albert Einstein, Carl Sagan, Bertrand Russell; y a esta lista me atrevo a agregar a Mario Molina. Los filósofos posmodernos, en especial los socio-constructivistas, dicen que la ciencia no es políticamente neutra, que se vende a los poderes fácticos de turno y que no existe tal cosa como la verdad objetiva, sino que existen solamente interpretaciones que triunfan por relaciones de poder. Toda esa clase de afirmaciones se van al tacho de la basura si se analiza uno de los casos más emblemáticos de la ciencia latinoamericana, el caso del Dr. Mario Molina. La historia del premio Nobel Mario Molina me toca no solo por el aporte al problema de los gases clorofluorocarbonados (CFC) y su relación con el agujero de la capa de ozono, que analizaré a continuación. Además me toca por cuanto Mario Molina es de los pocos latinoamericanos que han obtenido el premio Nobel en ciencias, pertenece a una de las disciplinas en las cuales me he especializado -la Química Ambiental- y, finalmente, porque al momento de escribir estas palabras él está vivo y he tenido ocasión de ver trabajos de su grupo de investigación en congresos de Química Ambiental. En resumen, Mario Molina es un Nobel de mi generación. Sin más preámbulos, los guiaré por los aspectos más destacables de la obra de Mario Molina, que lo llevaron a ganar el premio Nobel y, literalmente, a salvar el mundo tal como lo conocemos.

### **Desarrollo**

#### **Los gases CFC, su origen y usos**

Ubiquémonos en el contexto histórico. Corre la década de los años 20, hace casi un siglo, y los electrodomésticos se han tomado las cocinas de los países desarrollados. Uno de los aparatos más revolucionarios de la época era el refrigerador, que permitió almacenar alimentos, los cuales, sin este electrodoméstico, se degradarían mucho más rápido; alimentos como, por ejemplo, leche, huevos, carnes.

Los refrigeradores funcionan bajo un principio termodinámico un tanto complejo; pero, en palabras simples, explotan el ciclo de Carnot, un principio termodinámico clásico en el que se genera transferencia de energía mediante la expansión y compresión de ciertos gases, logrando, en el caso de los refrigeradores, disminuir la temperatura del sistema. Es un proceso que requiere de energía y, además, de gases suficientemente estables para que soporten estos cambios de temperatura y presión, y tener buena conductividad térmica. Pocos gases poseen las propiedades necesarias para poder ser ocupados con estos propósitos. Uno de ellos de estos gases es el amoníaco.

El problema de los refrigeradores de aquella época consistía en que el amoníaco es un gas reactivo, sumamente irritante para quienes se exponen a él, y tiende a combustionar. En resumen, es un gas peligrosísimo para las personas que trabajan con él, y es así como muchos trabajadores que construían refrigeradores de aquella época sufrieron accidentes graves, provocando incluso la muerte.

La empresa Dupont, en esos años, sintetizó una familia de gases refrigerantes denominados CFC. La sigla tiene su origen en la estructura química de las moléculas de los gases, que poseen la particularidad de ser moléculas que tienen átomos de cloro y flúor en su estructura. La traducción sería: gases Cloro Fluoro Carbonados o CFC, como se les conoce industrialmente. Los gases CFC son por lo tanto una familia de compuestos, y su estructura se asemeja a uno de los gases CFC que se muestra en la figura 1.

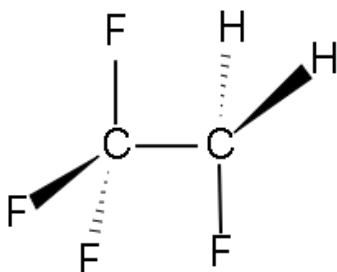


Figura 1: Molécula del CFC tetrafluoroetano

En los refrigeradores, estos gases cumplían la misma función que el amoníaco, pero con la particularidad de que eran gases muy estables; su reactividad y toxicidad en tierra es muy baja, por lo que se transformaron en gases bastantes seguros de manipular por parte de los trabajadores. El principal problema de estos gases para los trabajadores, más que la intoxicación, es el desplazamiento del oxígeno del aire, que podría llevar a asfixia, lo cual es muy poco probable. Literalmente, estos gases salvaron vidas de trabajadores. Digo esto por experiencia directa, por cuanto mi padre, soldador de contenedores, algunos de estos refrigerados, sigue trabajando con este tipo de gases.

En esa época, el uso de estos gases se expandió a los desodorantes en aerosol. Un aerosol se genera al mezclar un líquido con un gas a elevado flujo. Los gases CFC, debido a su estabilidad y muy baja toxicidad, se transformaron en los gases de la mayoría, por no decir de todas, las latas de aerosol tales como desodorantes, lacas, insecticidas, etc.

Se manejaba la estadística, en aquella época, que un hogar promedio en Estados Unidos consumía siete latas con gases CFC al mes, por lo que la cantidad de gases CFC que se liberaban a la atmósfera, solo por conceptos de uso en aerosoles era enorme, sin contar los gases CFC que se arrojaban cuando los refrigeradores terminaban su vida útil.

### **El gas ozono, su formación y su rol protector para la vida**

Corría la década de los 50 y la contaminación atmosférica era algo sabido. Las emanaciones de gases ácidos, tales como los óxidos de azufre y de nitrógeno, estaban ya constatadas. La lluvia ácida generada por las emanaciones de estos gases se manifestaba con sus efectos sobre estructuras y sobre la agricultura.

Ya en los años 60 se tenía claridad de la existencia del gas ozono y de la existencia de una capa de este gas en la alta atmósfera, como también del rol vital que cumple como filtro de la radiación UV de alta energía. El gas ozono ( $O_3$ ) se sintetiza de forma natural en la alta atmósfera, específicamente en la estratósfera, muy por sobre la altura máxima del monte Everest, a una altura de hasta 50 km del nivel del mar, mediante las siguientes reacciones: En primer lugar el oxígeno molecular atmosférico se destruye en la alta atmósfera debido a la radiación de alta energía, radiación UV, la cual es muy intensa a esa altura. Esta destrucción se muestra en la ecuación 1.



Como se muestra en la ecuación 1, la radiación UV rompe la molécula de oxígeno generando oxígeno radical, que es una especie muy inestable y, por lo tanto, reactiva. Considerando que el  $O_2$  en la atmósfera es un gas mayoritario, este oxígeno radical  $O\bullet$  reacciona con el exceso de oxígeno molecular ( $O_2$ ) para formar ozono ( $O_3$ ) de acuerdo a la ecuación 2.



Este gas  $O_3$  formado presenta la característica positiva para nosotros, y es que absorbe la radiación solar dañina, que es capaz de romper moléculas perjudicando a la vida en nuestro planeta. Debemos comprender que el espectro de emisión de radiación del sol emite fotones cuyas longitudes de onda abarca una gran parte del espectro electromagnético, incluyendo la radiación UV y visible. En términos numéricos, la radiación UV se estima que son los fotones cuya longitud de onda va desde los 200 nm hasta aproximadamente los 400 nm. Los fotones con longitudes de onda visible van desde los 400 nm hasta aproximadamente 800 nm.

La radiación UV, es decir, los fotones cuyas longitudes de onda son menores, son los fotones más dañinos, por cuanto portan una mayor energía. A nivel molecular, la interacción de estos fotones con moléculas es destructiva, esto porque estos fotones cuando son absorbidos por moléculas, culmina con una transición de sus electrones enlazantes hacia niveles energéticos muy elevados llevando la mayoría de las veces a la ruptura del enlace molecular.

La ruptura de enlaces moleculares es sumamente dañina para la vida. Debemos recordar que gran parte de las bases químicas de la vida son partículas moleculares. La ruptura de un enlace puede generar mutaciones y cáncer, entre otros problemas. Es esta una de las principales razones del cáncer a la piel.

Por su parte, la radiación visible no solo no es dañina, sino necesaria. La absorción de fotones visible, de longitud de onda más larga, es mucho menos probable que genere ruptura de enlaces moleculares, siendo su principal efecto la excitación de los electrones enlazantes y consecuentes vibraciones y rotaciones moleculares. En resumen, la absorción de fotones visible le entrega energía a las moléculas, energía que es necesaria para que muchas reacciones químicas no espontáneas ocurran, reacciones tan importantes como la síntesis de hidratos de carbono por los vegetales (fotosíntesis), la base de la cadena alimenticia, síntesis de algunas vitaminas, etc.

En conclusión, la radiación solar es una moneda con una doble cara: por un lado es dañina para la vida en su espectro UV, pero por otra es indispensable para los ecosistemas en su espectro visible, y el gas ozono de la atmosfera nos protege del espectro dañino.

Gracias al gas ozono gran parte de la radiación solar dañina no llega mayormente a la superficie terrestre, por lo que la sustentabilidad de la vida de nuestro planeta depende de la presencia de ozono estratosférico; digo gran parte por cuanto una pequeña fracción del espectro UV llega a tierra de todas formas y esa es la razón por la cual debemos aplicarnos protector solar.

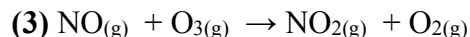
### **La preocupación por la destrucción del ozono atmosférico**

El gas ozono se distribuye en la alta atmósfera, que es donde se forma, en una delgada capa de unas decenas de kilómetros y su concentración es bastante baja comparada con los otros gases atmosféricos, tales como el oxígeno y el nitrógeno. Esto ya se sabía en la década de los 70, y por lo tanto la importancia y fragilidad de esta capa gaseosa estaba en estudio.

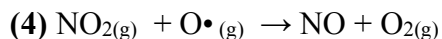
Ahora bien, en los años 70 el científico Crutzen se preocupó de estudiar los efectos que tenían los óxidos de nitrógeno sobre el contenido de ozono atmosférico (Crutzen, 1970, 1974). Estos óxidos de nitrógeno no solo los emiten las fuentes terrestres como automóviles e industrias, sino que además se generan en el proceso de combustión de combustible por parte de aviones y transbordadores espaciales. Crutzen evaluó el efecto de las emisiones de estos gases en la alta atmósfera debido precisamente a que ahí es donde el ozono estaba presente.

Las reacciones de combustibles fósiles generan, además de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  y  $\text{H}_2\text{O}$ , gases nitrogenados del tipo  $\text{NO}$  y  $\text{NO}_2$ . Como vimos anteriormente, el gas ozono es muy importante, y este se forma desde la reacción de  $\text{O}^\bullet$  con  $\text{O}_2$ . Crutzen reportó que los gases nitrogenados no solo destruyen el gas ozono presente en la alta atmósfera, sino que además atrapan a su precursor, el radical  $\text{O}^\bullet$ .

La reacción de destrucción del O<sub>3</sub> se muestra en la ecuación 3.



La reacción del O• con un gas nitrogenado se muestra en la ecuación 4.



Como vemos en las ecuaciones 3 y 4, hay dos gases nitrogenados alterando la formación de ozono, el óxido de nitrógeno 2 (NO) y el óxido de nitrógeno 4 (NO<sub>2</sub>). En donde en la reacción de la ecuación 4 el producto es NO, que puede a su vez destruir otra molécula de ozono sobre la base de la reacción 3.

¿Cuál fue la preocupación de las autoridades de la época? Se dice que la principal fue que existían muchos proyectos ingenieriles para construir jets supersónicos y transbordadores espaciales, y si se demostraba que destruían la capa de ozono, dichos proyectos corrían el riesgo de ser cancelados, sobre todo por las presiones sociales de grupos ambientalistas. Con el propósito de estar atento a cualquier problema relacionado con una posible destrucción de la capa de ozono, el gobierno de Estados Unidos ordenó un programa de monitoreo del ozono atmosférico.

En 1972 la NASA termina por aprobar uno de sus proyectos de transbordadores espaciales, no sin antes dar cuenta, dentro de la misma agencia, de la aún persistente preocupación por el efecto de las operaciones espaciales sobre la composición atmosférica y la capa de ozono.

### **Mario Molina, su historia e incidencia en el problema de la capa de ozono**

En el contexto anterior entra la figura de Mario Molina. El Dr. Molina nació en México el año 1943. Cuando tenía un año de vida, lamentablemente su madre murió. Su padre, un abogado con buena situación económica, siempre le entregó un gran acceso a la cultura y a la educación, lo cual Mario Molina aprovechó de buena manera. En sus propias palabras, que puede usted encontrar en YouTube, Mario Molina manifestó de niño un gran interés tanto por la música como por la ciencia, cultivando ambas ("Historias de vida-Mario Molina"). Debido a presiones familiares, Molina-niño decidió dedicarse mayormente a la ciencia, por cuanto le informaron que el cultivo de la música requiere de muchísimas horas diarias de práctica. Respecto a esta decisión, hasta el día de hoy él manifiesta cierto grado de arrepentimiento.

De niño Mario Molina se dedicó a la lectura y además a realizar experimentos de química, a modo de entretenimiento. Dice él que fue una tía, que era profesora de química, la que le ayudó a diseñar experimentos más complejos; pero no tenía amigos que compartieran el mismo interés.

Ya adolescente fue enviado a Suiza a educarse, y ahí sí encontró algunos amigos que compartían su interés por la experimentación. Ya adulto, volvió a México y estudió en la Universidad Autónoma de México. Se tituló de ingeniero químico en 1965.

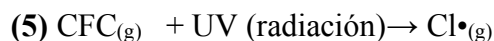
En 1972 recibió su grado de doctor en la especialidad de Físico-Química, en la *Berkeley University of California*.

Hasta aquí no hay nada fuera de la norma en su carrera. Aparte de ser un buen estudiante, nada anticipa la obtención de un premio Nobel.

En 1973, el ya Dr. Molina decide hacer una estadía posdoctoral en el laboratorio del Dr. Sherwood Rowland. En palabras del propio Molina, se interesó -confiesa- en trabajar con él por cuanto el Dr. Rowland era un científico que se caracterizaba por aplicar conceptos teóricos fundamentales, pero para estudiar sistemas reales.

Conociendo la gran cantidad de gases CFC que se estaban consumiendo y arrojando diariamente a la atmósfera desde décadas atrás, se propusieron estudiar la distribución de dichos gases. Debido a su densidad, se sabía que estos gases debían ascender hasta la alta atmósfera. Sobre la base de cálculos teóricos y datos experimentales, estos investigadores concluyeron:

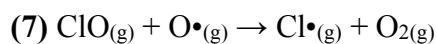
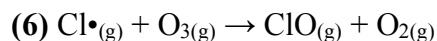
1. Que los gases CFC podían permanecer desde 40 hasta 150 años en la atmósfera antes de degradarse.
2. A base del consumo de la época y la persistencia de estos gases, se debieran alcanzar niveles de gases CFC hasta 30 veces más altos que los reportados hasta la fecha.
3. Si bien es cierto los gases CFC son bastante estables a nivel del mar, en la alta atmósfera, debido a la elevada radiación solar a esta altura, los gases CFC se destruyen parcialmente, generando átomos de cloro radical. Un ejemplo de esta reacción es el siguiente.



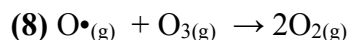
El cloro radical es un átomo de cloro, pero que posee un electrón desapareado en su estructura. A diferencia de los átomos de cloro, que se encuentran en el compuesto NaCl el cual se denomina cloruro que usted encuentra en muchos de sus alimentos y que posee pares de electrones apareados lo cual lo hace muy estable, el cloro radical es altamente reactivo.

4. Este cloro radical, hipotéticamente según algunos estudios experimentales de la época, debía destruir el gas ozono, como también interrumpir su proceso natural de formación, al igual que los gases nitrogenados descritos en los estudios de Crutzen, pero a una velocidad de reacción seis veces mayor.

La acción del cloro radical es doble, por cuanto las reacciones acopladas consumen tanto al gas ozono como al oxígeno radical como se muestra en las ecuaciones 6 y 7.



Como podrán darse cuenta, la especie  $\text{Cl}\bullet$  aparece en los productos y los reactantes, por lo que, si acoplamos las reacciones de las ecuaciones 6 y 7, tenemos que la reacción general de ambas sería la que se presenta en la ecuación 8.



Es decir, el  $\text{Cl}\bullet$  actúa como un catalizador de la destrucción del  $\text{O}_3$ . Las conclusiones de esta investigación fueron publicadas en 1974 en la prestigiosa revista *Nature* (M. J. Molina & Rowland, 1974b). Es importante aclarar que si bien es cierto las conclusiones de este estudio eran preocupantes, de toda manera la investigación presentaba la limitación de ser un estudio basado en cálculos teóricos y datos experimentales previamente publicados. Hasta la fecha aún no habían pruebas de que este efecto del  $\text{Cl}\bullet$  sobre el  $\text{O}_3$  realmente estaba ocurriendo en la alta atmósfera. Es decir, se requería de evidencias más directas y, por lo tanto, más investigación como para alertar a la población. Por lo mismo, Molina y Rowland continuaron aportando más investigaciones respecto de los gases CFC y su reactividad asociada al ozono atmosférico, y publicaron una serie de trabajos al respecto, bastante influyentes, pero todos ellos centrados en y limitados por las condiciones terrestres, faltando siempre la evidencia directa en la alta atmósfera (L. T. Molina & Molina, 1977, 1979; L. T. Molina, Schinke, & Molina, 1977; L. T. Molina, Spencer, & Molina, 1977; M. J. Molina & Rowland, 1974a, 1974b; F. S. Rowland & Mario J. Molina, 1975; F. S. Rowland & M. J. Molina, 1975; Rowland & Molina, 1976; Rowland, Molina, & Chou, 1975; Rowland, Spencer, & Molina, 1976a, 1976b).

En esa misma década se lanzó el programa de investigación de la alta atmósfera mediante el satélite UARS. Este satélite portaba una serie de instrumentos para hacer mediciones directamente en la alta atmósfera, programa alentado y financiado principalmente por los intereses norteamericanos vinculados a sus programas espaciales. La composición de la alta atmósfera era de especial interés para los programas espaciales norteamericanos por cuanto era un peligro latente el daño que podrían generar estos viajes espaciales sobre la composición química de la alta atmósfera por lo que el monitoreo de la composición química en especial del ozono en esta zona era la mejor forma de evaluar los potenciales efectos de esta actividad aeroespacial.

Molina y Rowland, convencidos de que el problema de los gases CFC era real y que nos afectaba como humanidad, hicieron algo que muy pocos científicos hacemos o, si lo intentamos, normalmente tenemos muy pocos resultados, y fue llevar este conocimiento a la población no científica a través de los medios de comunicación, con bastante éxito. Se estima que en esos años se presentaron más de 300 historias acerca de la capa de ozono en los medios de comunicación, generando alarma pública. El gobierno de Estados Unidos citó a Molina y Rowland al Congreso para entregar información y responder dudas legítimas de los congresistas (Nuño, Álvarez, & Corpus, 2015).

Todavía a mediados de la década de los 70, a pocos años de los trabajos de Rowland y Molina, ya había mucho ruido en la población respecto de los gases CFCs y su impacto en la capa de ozono. Al respecto la Dupont, fabricante de estos gases, contraataca intentando desacreditar a Molina y Rowland, afirmando que todo esto de los gases CFC y el daño a la

capa de ozono era una mera historia de ciencia ficción. Sin embargo, ya en el año 1977 la empresa Gillette comienza a reportar pérdidas de un 30% en sus ventas debido a que la gente estaba dejando de consumir desodorantes con gases CFC, tendencia que también estaba afectando a otras compañías. Es decir, la población tomó conciencia del problema y comenzó a tomar decisiones al respecto antes que los políticos.

En un principio, esta alarma general de la población tuvo eco en el gobierno de Estados Unidos mediante una medida un tanto tibia, la de obligar a las latas de aerosoles con gases CFC a poner una etiqueta que dijera que este producto poseía gases CFC en su interior. La etiqueta generó que la población bajara la compra de estas latas, y esto llevó a que ya en 1978 se prohibiera el uso de los gases CFC en aerosoles en Estados Unidos, Noruega, Canadá y Suecia. En la década de los años 80 el presidente de Estados Unidos, Ronald Reagan, mantiene el apoyo para los estudios científicos, pero se niega a intervenir más en la industria, al menos hasta que no existiera mayor evidencia del real problema ambiental de los gases CFC.

En 1985 se publica una investigación en la revista Nature, basada en mediciones atmosféricas, en donde se concluye por primera vez que las concentraciones de ozono en la antártica eran muy bajas, y se podía hablar literalmente que existía un agujero en la capa de ozono en esa zona, y que además este agujero tenía relación con la presencia de gases clorados y nitrogenados (Farman, Gardiner & Shanklin, 1985). Esta era la evidencia definitiva que terminaba, al menos a nivel científico, la discusión respecto de la realidad de la destrucción del ozono por parte de los gases CFC y gases nitrogenados, y le daba la razón a Rowland, Molina y Crutzen.

En 1987 la agencia NOAA de Estados Unidos lanza una misión para determinar la presencia de los gases CFC en la Antártica y se concluye no solo en que estos están presentes, sino que además son los causantes del agujero de la capa de ozono. Desde ahí el problema de los gases CFC como causante del agujero de la capa de ozono comenzó a tener aceptación a nivel del gobierno de Estados Unidos.

### **La política, los gases CFC y el agujero de la capa de ozono**

Como el problema de los gases CFC no existía solo de Norteamérica, aún quedaba dar un paso mayor para intentar resolverlo y era convencer a los líderes de otros países, en especial de los más desarrollados, de manera de lograr un acuerdo que disminuyera la producción de gases CFC a escala mundial.

Como siempre ha sido a lo largo de la historia de la civilización moderna, cuesta mucho convencer a políticos que tomen decisiones en contra de una actividad industrial de escala mundial. Un ejemplo de aquello, es la situación actual de cómo se ha opuesto la industria de combustibles a la visión científica de las causas del efecto invernadero, negando la relación entre CO<sub>2</sub> y calentamiento global y presionando a través del lobby para evitar restricciones al uso de combustibles fósiles, llegando a elegirse como presidente de Estados Unidos a Donald Trump, un reconocido negacionista del calentamiento global causado por la quema de combustibles fósiles.



Para el caso de los CFC, en aquella época el principal productor de estos compuestos era la industria Dupont, una industria gigante de Estados Unidos (la cual actualmente se dedica a la ciencia y tecnología de productos agropecuarios). Y al igual que ahora para el caso del calentamiento global, también existieron movimientos negacionistas apoyados por algunos productores de CFC quienes afirmaban que la relación entre CFC y el ozono de la alta atmósfera era mera ciencia ficción.

Afortunadamente para la humanidad, estos grupos negacionistas no tuvieron mucho éxito y los presidentes de las principales potencias del mundo acordaron reducir la producción de gases CFC a la mitad en el lapso de un par de décadas. Se trata del llamado protocolo de Montreal, ciudad donde este protocolo fue firmado en 1987. Ahora bien, ¿Cómo se logró este acuerdo?

En este punto la historia es muy sabrosa, por cuanto aparece un personaje que políticamente fue muy polémica, y su apodo lo dice todo: la ¡Dama de Hierro!, la temible Margaret Thatcher, la entonces primera ministra de Inglaterra.

Thatcher era una mujer que presentaba varias particularidades, las cuales incluso para nuestra época son difíciles de encontrar todas juntas en una persona. En primer lugar, era una mujer con el cargo político más importante del Reino Unido. Todos sabemos lo difícil que es para las mujeres, incluso actuales, acceder a cargos de poder, más aún en países desarrollados. Pues bien, Thatcher lo consiguió en la década de los 80, cuando el machismo era mucho más marcado que hoy. En segundo lugar, era una política que poseía una formación científica de elite. Estudió en el Somerville College nada menos que con la gran Dorothy Hodgkins, premio Nobel de Química del año 1964 por sus aportes para develar la estructura molecular de dos compuestos sumamente importantes para la vida y la sociedad, la penicilina y la vitamina B12 (Abraham, Joseph, Crowfoot, & Osborn, 1946). Hodgkins no solo fue su profesora, sino su mentora y amiga personal, incluso cuando Thatcher alcanzó el poder.

¿Qué tiene que ver esto con el tema de los gases CFC? Se dice que gracias a que Thatcher fue capaz de dimensionar el problema de los gases CFC debido a su formación científica de elite, ella misma fue quien logró convencer a Ronald Reagan, el presidente de Estados Unidos de la época (cuya profesión era actor, bastante alejado de la ciencia), sobre la gravedad del problema de los gases CFC en relación con el agujero de la capa de ozono, por cuanto era la única política que comprendía los estudios y ponderó las evidencias contundentes que permitían afirmar que la destrucción de la capa de ozono por los gases CFC y sus nocivos efectos sobre la biósfera eran reales. Además, es sabido que Reagan tenía una gran cercanía con Thatcher, con quien tenía afinidad no solo de personalidad sino también política.

Debemos recordar que Estados Unidos es un país que a nivel científico presenta ciertas contradicciones. Es, sin lugar a dudas, el líder en ciencia y tecnología, con el mayor número de premios Nobel, de artículos científicos, patentes, etc. Ahora bien, también es reconocido por la poca cultura y valoración de la ciencia de parte de su población y de sus políticos en comparación por ejemplo con el Reino Unido o casi todos los países desarrollados de

Europa. Por ejemplo, es impresionante la cantidad de norteamericanos que no creen en la teoría de la evolución y son creacionistas; no creen en la teoría del Big Bang y reniegan de la realidad del CO<sub>2</sub> como causante del calentamiento global. Fue el mismo Carl Sagan quien denunció en los medios de comunicación norteamericanos la escasa formación científica de los políticos de Estados Unidos, quienes habían cerrado la oficina de ciencia y tecnología que asesoraba al congreso de Estados Unidos en aquella época. Por esto, el logro de Thatcher de convencer a Reagan fue sin lugar a dudas muy meritorio.

Podemos afirmar que el conocimiento científico respecto de la destrucción de la capa de ozono se lo debemos a Molina, Rowland y Crutzen. La divulgación a la población de este conocimiento se lo debemos principalmente a Molina y Rowland. Sin embargo, la presión social para eliminar los gases CFC no se lo debemos solo a ellos, sino también a Thatcher, quien convenció al presidente del principal país productor de gases CFC de la necesidad de reducir su producción y firmar el protocolo de Montreal. Y no debemos olvidar a Hodgkins, quien formó científicamente a Thatcher.

Luego que todo pasó, Molina reflexionó y afirmó:

*“Los científicos pueden plantear problemas que afectarán al medio ambiente con base en la evidencia disponible, pero su solución no es responsabilidad de los científicos, es de toda la sociedad”*

A Mario Molina, Rowland y Crutzen le dieron el merecido premio Nobel de Química el año 1995, ocho años después de la firma del protocolo de Montreal el año 1987.

Ahora bien, toda esta historia que culminó con un acuerdo político global sin precedentes, ¿realmente tuvo un final feliz? Los fenómenos atmosféricos son muy complejos. El observar tendencias de cambios a nivel atmosférico se hace imposible en un solo año, por cuanto, sumadas a las variables químicas, existen variables climáticas, estacionales; incluso la actividad solar influye. Por ejemplo, si se observa en un año el área congelada de los polos, se verá que estos, así como se derriten, también se vuelven a formar, y este proceso puede ser tanto natural como alterado por la actividad humana. Con el agujero de la capa de ozono esta variabilidad no es muy diferente. El aumento o disminución de este agujero se debe también a fenómenos estacionales y no solo a fenómenos de contaminación por gases CFC. Con posterioridad al protocolo de Montreal, cada vez que se publicaba un estudio que decía tener evidencias de que la capa de Ozono se estaba recuperando, surgían voces escépticas diciendo que eso podría ser un fenómeno natural y no producto de la disminución de los gases CFC. De hecho, los mismos estudios de Rowland y Molina planteaban claramente que el ozono atmosférico tomaría décadas en recuperarse, dado que los gases CFC ya emitidos tenían la suficiente estabilidad para continuar destruyendo el ozono estratosférico por más años desde su emisión.

El año 2017 los autores Kuttippurath y Nair publicaron un trabajo en Scientific Report con una estadística muy completa, considerando variables físicas y estacionales, en un lapso de tiempo de más de 10 años, y concluyen que desde el año 2000 se puede afirmar con un 95% de confianza que existe una recuperación sostenida del ozono atmosférico del orden de 0,5% al año, por lo que podemos afirmar que a poco más de 30 años de la firma del protocolo de

Montreal por parte de los países desarrollados, incluido Estados Unidos, ya están las primeras evidencias concluyentes respecto al retroceso del agujero de la capa de ozono, el cual al parecer se está cerrando de a poco (Kuttippurath & Nair, 2017).

### Conclusión

El caso de Mario Molina es el de un científico latinoamericano que se transformó en un héroe, aunque no debemos desconocer que los hechos se dieron en un contexto social que fue propicio. Pero también es cierto que Mario Molina contribuyó en gran medida a generar estas condiciones para que, a menos de trece años de su artículo de 1974, se lograra la firma del protocolo de Montreal. A la fecha, este artículo de Molina suma más de 2300 citas, lo que demuestra su gran impacto científico y social. Los gases CFC son reales, el agujero de la capa de ozono también lo es, y la decisión que se tomó a escala mundial para reducir sus emisiones es buena; esto no es un mero consenso. La verdad triunfó sobre el poder del dinero, la ciencia no se vendió a la Dupont ni mucho menos. Casos como este demuestran que acusar a la ciencia de “crear realidades” basadas en la presión del capitalismo no solo es una acusación injusta sino dañina. Es injusta por cuanto si bien es cierto se han dado casos, como el de la industria del cigarro, en donde se han comprado y tergiversado conclusiones, también es cierto que es dentro de la misma ciencia donde estos fraudes se han detectado, denunciado y corregido. La ciencia posee un mecanismo corrector para estos casos. No confundan la naturaleza de la ciencia con la naturaleza de los científicos, que somos humanos y corruptibles; como dijo Diego Maradona, valga la analogía, la pelota no se mancha, al referirse a la corrupción del fútbol y a sus errores como futbolista.

No me queda más que decir ¡gracias Mario Molina por brindarnos un futuro mejor! Y espero que esta historia nos entregue esperanzas para que continuemos por una senda similar para resolver el problema del calentamiento global y su relación con el CO<sub>2</sub>, historia que les contaré en un número próximo.

### Bibliografía

- Abraham, E. P., Joseph, A. E., Crowfoot, D. M., & Osborn, E. M. (1946). An antibacterial substance from *Arctium minus* and *Onopordon tauricum* [1]. *Nature*, 158(4021), 744-745.
- Crutzen, P. J. (1970). The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. [Article]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 96(408), 320-325. doi: 10.1002/qj.49709640815
- Crutzen, P. J. (1974). Estimates of possible variations in total ozone due to natural causes and human activities. *Ambio*, 3(6), 201-210.
- Farman, J. C., Gardiner, B. G., & Shanklin, J. D. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO<sub>x</sub>/NO<sub>x</sub> interaction. [Article]. *Nature*, 315(6016), 207-210. doi: 10.1038/315207a0
- Historias de vida-Mario Molina. from [https://www.youtube.com/watch?v=jX3\\_WR5q54k&t=694s&index=5&list=PLJTiB8fMCNfrQBsWlzavNK7yTW-J76Krz](https://www.youtube.com/watch?v=jX3_WR5q54k&t=694s&index=5&list=PLJTiB8fMCNfrQBsWlzavNK7yTW-J76Krz)
- Kuttippurath, J., & Nair, P. J. (2017). The signs of Antarctic ozone hole recovery. *Scientific*

- Reports*, 7(1), 585. doi: 10.1038/s41598-017-00722-7
- Molina, L. T., & Molina, M. J. (1977). Ultraviolet absorption spectrum of chlorine nitrite, ClONO. [Article]. *Geophysical Research Letters*, 4(2), 83-86. doi: 10.1029/GL004i002p00083.
- Molina, L. T., & Molina, M. J. (1979). Chlorine nitrate ultraviolet absorption spectrum at stratospheric temperatures. [Article]. *Journal of Photochemistry*, 11(2), 139-144. doi: 10.1016/0047-2670(79)80047-7
- Molina, L. T., Schinke, S. D., & Molina, M. J. (1977). Ultraviolet absorption spectrum of hydrogen peroxide vapor. [Article]. *Geophysical Research Letters*, 4(12), 580-582. doi: 10.1029/GL004i012p00580
- Molina, L. T., Spencer, J. E., & Molina, M. J. (1977). The rate constant for the reaction of O(3P) atoms with ClONO<sub>2</sub>. [Article]. *Chemical Physics Letters*, 45(1), 158-162. doi: 10.1016/0009-2614(77)85233-0
- Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974a). Predicted present stratospheric abundances of chlorine species from photodissociation of carbon tetrachloride. [Article]. *Geophysical Research Letters*, 1(7), 309-312. doi: 10.1029/GL001i007p00309
- Molina, M. J., & Rowland, F. S. (1974b). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. [Article]. *Nature*, 249(5460), 810-812. doi: 10.1038/249810a0
- Nuño, J. G. C., Álvarez, D. J., & Corpus, J. A. P. (2015). Mario Molina and the saga of Ozone example of linking science and society. [Article]. *Andamios*, 12(29), 15-32.
- Rowland, F. S., & Molina, M. J. (1975). CHLOROFLUOROMETHANES IN THE ENVIRONMENT. *Rev Geophys Space Phys*, 13(1), 1-35.
- Rowland, F. S., & Molina, M. J. (1975). Chlorofluoromethanes in the environment. [Review]. *Reviews of Geophysics*, 13(1), 1-35. doi: 10.1029/RG013i001p00001
- Rowland, F. S., & Molina, M. J. (1976). Estimated future atmospheric concentrations of CCl<sub>3</sub>F (fluorocarbon-11) for various hypothetical tropospheric removal rates. [Article]. *Journal of Physical Chemistry*, 80(19), 2049-2056.
- Rowland, F. S., Molina, M. J., & Chou, C. C. (1975). Natural halocarbons in air and sea. [Article]. *Nature*, 258(5537), 775-776. doi: 10.1038/258775c0
- Rowland, F. S., Spencer, J. E., & Molina, M. J. (1976a). Estimated relative abundance of chlorine nitrate among stratospheric chlorine compounds [7]. [Letter]. *Journal of Physical Chemistry*, 80(24), 2713-2715.
- Rowland, F. S., Spencer, J. E., & Molina, M. J. (1976b). Stratospheric formation and photolysis of chlorine nitrate [6]. [Letter]. *Journal of Physical Chemistry*, 80(24), 2711-2713.