

Crónicas del Antropoceno: el siglo del tetraetilo de plomo

Gabriela A. Vázquez Rodríguez



G. A. Vázquez Rodríguez

Área Académica de Química
Universidad Autónoma del Estado
de Hidalgo
Ciudad del Conocimiento, 42184,
Mineral de la Reforma, Hidalgo
(México)
E-mail: gvazquez@uaeh.edu.mx
Recibido: 30/06/2021
Aceptado: 21/03/2022

Resumen: Este artículo explora brevemente la historia del tetraetilo de plomo (TEP), desde su descubrimiento en 1921 como agente antidetonante en gasolina hasta su prohibición mundial. Se revisa cómo, gracias al cabildeo industrial, la publicidad y a la falta de investigación científica independiente, este compuesto pudo llegar a tener un uso tan extendido, a pesar de su extrema toxicidad. Se repasan también las alternativas al TEP que existían, y que fueron conocidas por las personas que impulsaron su uso. Finalmente, se presenta el papel de Clair Patterson en señalar los riesgos derivados de la contaminación global por plomo.

Palabras clave: Metal pesado, motor de combustión interna, Thomas Midgley, gasolina, contaminación global.

Abstracts: This article briefly explores the history of tetraethyllead, from its discovery as a gasoline antiknock agent in 1921 until its total world ban. It is examined how, thanks to industrial lobbying, advertising, and lacking independent scientific research, this compound could be so extensively used, despite its extreme toxicity. Also, the alternatives to tetraethyllead available at that time are reviewed, which were well known to the people that promoted its use. Finally, the role of Clair Patterson in drawing attention to the risks of global lead contamination is featured.

Keywords: Heavy metal, internal combustion engine, Thomas Midgley, gasoline, global pollution.

Introducción

El Antropoceno se ha definido como la era geológica presente, en la que el ser humano representa una fuerza de transformación con alcance planetario, y que en el futuro podría rastrearse en el registro geológico.^[1] Se trata sin duda de una idea poderosa, que invita a una transformación radical en la relación que la humanidad ha establecido con el medio ambiente.^[2] Sin embargo, entre otras críticas, se le ha reprochado que sea una generalización inexacta, que no cuestiona el papel diferenciado que han jugado ciertos países y sus élites en el cambio global.^[3] Así, no es posible aseverar que la especie humana es la causa de la crisis climática cuando el 10% más rico de la población mundial generó el 52% de las emisiones de carbono acumuladas en el periodo 1990-2015.^[4] Esta extrema desigualdad tiene su epítome en el caso del tetraetilo de plomo (TEP; Figura 1), en el que unas cuantas personas tuvieron un papel decisivo en crear un problema de contaminación global.

En 2021 se cumplieron 100 años del descubrimiento del TEP como agente antidetonante en los motores de combustión interna. A partir de este descubrimiento y durante más de nueve décadas, millones de automovilistas de todo el mundo llenaron sus tanques con gasolina a la que se le había añadido TEP, y dispersaron a la atmósfera enormes cantidades de un metal pesado cuya toxicidad era conocida desde la antigüedad. El artífice de la gasolina con plomo, Thomas Mid-

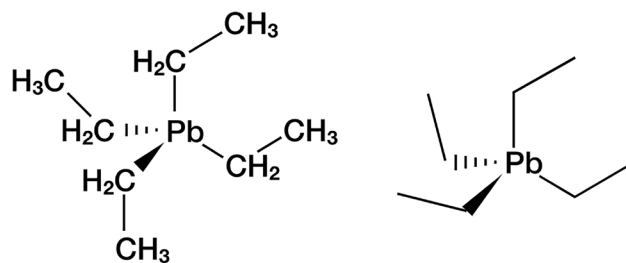


Figura 1. Estructura química del tetraetilo de plomo. Imagen de dominio público, tomada de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=1065208>

gley, también lo fue del empleo de los clorofluorocarbonos en refrigeración que, como se sabría décadas más tarde, son los principales causantes de la destrucción de la capa de ozono estratosférico. Con justificada razón el historiador ambiental John McNeill ha dicho que, en toda la historia de la Tierra, Midgley es el organismo individual que más ha perjudicado a la atmósfera,^[5] aunque hay quien ha señalado que su influencia negativa se extiende a todo el medio ambiente.^[6]

En este artículo se hace un recuento histórico de las causas por las que la adición de plomo a la gasolina fue tan común, y algunas de las consecuencias de lo anterior. Se dedica también un espacio a las prácticas de cabildeo de las empresas implicadas, y a los científicos que encumbraron y combatieron al primer contaminante global conocido.

De automóviles y golpeteo

A finales del siglo XIX, las sociedades occidentales abrazaron con entusiasmo las tecnologías que representaran modernidad, tales como el ferrocarril. Luego, con el desarrollo del motor de combustión interna, fue el turno de los automóviles impulsados con gasolina. Las innovaciones introducidas por Henry Ford, entre las que destaca la línea de montaje, se materializaron en el Modelo T, lanzado al mercado en 1908 y del cual se venderían más de 16 millones de unidades.^[7] La movilidad garantizada por el automóvil lo convirtió en la máquina de la libertad por excelencia que, además, prometía estar al alcance de todos los norteamericanos.

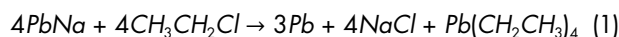
General Motors (GM) pretendía superar las altas ventas del Modelo T con su producto estrella, el Cadillac, para lo cual contrató a Charles Kettering. A través de su compañía, Delco (Dayton Engineering Laboratories), Kettering desarrolló el arranque eléctrico, que vendió a GM en 1911.^[8] Otra de las estrategias de GM se basó en fomentar las ventas gracias a cambios mínimos en la apariencia de las unidades, más que a innovaciones tecnológicas sustanciales. El cambio de modelo anual, que persiste hasta nuestros días, comenzó en 1927 y es un antecedente directo de la funesta práctica industrial conocida como obsolescencia programada.^[7]

Tras la invención del arranque eléctrico, Kettering se propuso mejorar la eficiencia del motor mediante un incremento en la compresión del combustible. Esto originaba una mayor potencia, pero también un golpeteo (*knocking*, en inglés) que, además de sacudir bruscamente al vehículo, disminuía la eficiencia del combustible, dañaba al motor y lo sobrecalentaba. Para resolver este problema, Kettering llamó a Thomas Midgley en 1916; este era un ingeniero mecánico egresado de la Universidad de Cornell, quien había sido recién contratado como químico en jefe de Dayton Research Laboratories Company, otra de las compañías que Kettering había fundado y que trabajaban para GM.^[8] Proveniente de una familia de inventores de Columbus, Ohio, Midgley era conocido por su obstinación al momento de resolver problemas, y se dio a la tarea de encontrar un compuesto que al añadirse a la gasolina redujera el golpeteo.

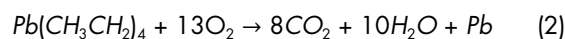
Después de varios experimentos de prueba y error, que Midgley calificaría más tarde como “un enfoque edisoniano”,^[9] llegó a la anilina en 1919 y descubrió su poder anti-detonante. Sin embargo, tuvieron que continuar la búsqueda porque este compuesto generaba olores desagradables y es corrosivo para metales.^[10] Por el consejo de un químico del Instituto de Tecnología de Massachussets, Midgley comenzó a considerar la periodicidad de las propiedades de los elementos. Tomando como base la anilina, Midgley y su equipo se enfocaron en probar compuestos que tuvieran elementos de los grupos 14 (del carbono) hasta el 17 (del flúor). Finalmente, encontraron los mejores resultados con los compuestos que tuvieran un elemento con alto número atómico (como el plomo, que es el elemento natural con mayor peso atómico del grupo 14, después del flerovio) unido al menos a un grupo etilo,^[10] y en diciembre de 1921 llegaron al TEP. Se dice que en total pudieron haber probado hasta 33,000 compuestos distintos, aunque este número varía según la fuente

consultada.^[11] Los resultados de la experimentación con el TEP se publicaron al año siguiente,^[12] e hicieron que Midgley recibiera la medalla William H. Nichols, otorgada por la sección de Nueva York de la American Chemical Society.

A diferencia de lo que sucede con el arsénico y el mercurio, los compuestos alquílicos del plomo no se forman naturalmente.^[13] El TEP había sido sintetizado por primera vez en forma impura por Carl Löwig, en 1853, al hacer reaccionar una aleación de plomo y sodio con yoduro de etilo.^[10] George Buckton lo aisló y lo caracterizó en 1859,^[10] y luego no despertó ningún interés sino hasta que, entre 1915 y 1925, se emprendieran estudios más detallados en laboratorios alemanes.^[14] Tras el éxito de los experimentos de Midgley, el TEP empezó a sintetizarse a partir de yodoetano y posteriormente de bromoetano; sin embargo, ambos compuestos debieron sustituirse por su alto costo. La asociación con GM impulsó a la compañía Standard Oil a financiar el desarrollo de un nuevo proceso a base de cloroetano, que fue ideado por Charles August Kraus y Conrad Callis y patentado en 1923. El proceso Kraus-Callis emplea una aleación PbNa en relación 1:1, y recupera el TEP (Reacción 1) por destilación con arrastre de vapor.^[15]



Los cuatro enlaces carbono-plomo del TEP (Figura 1) se rompen fácilmente a los 2800 K que se alcanzan en un motor de combustión interna,^[16] en donde se transforman en plomo, óxidos de plomo y radicales hidroperóxido de alquilo, estos últimos de vida corta. Las siguientes reacciones representan la combustión completa del TEP:



El golpeteo del motor se reduce a través de la inactivación de los intermediarios de la oxidación de los hidrocarburos de la gasolina (los radicales hidroperóxido de alquilo) que realizan el plomo (Reacción 2) y el óxido de plomo (Reacción 3) formados.^[15] Algún tiempo después, se observó que la acumulación de óxido de plomo en las válvulas de escape, las bujías y en la cámara de combustión causaba daños severos al motor, lo cual se resolvería en 1928. Ese año, además de TEP, empezó a añadirse 1,2-dicloroetano y 1,2-dibromoetano a la gasolina, los que al combinarse con el óxido de plomo y producir PbCl_2 y PbBr_2 , respectivamente, funcionaban como “neutralizadores” (*scavengers*, en inglés) del óxido.¹ Ambos halogenuros de plomo son volátiles y eran expeditos fácilmente desde el motor hacia la atmósfera.^[14,17]

Kettering le dio a la gasolina adicionada con TEP el nombre de *Ethyl* (que en lo sucesivo aparecerá en cursivas para designar al producto), que omitía mencionar al plomo porque “este término podía perjudicar su uso”.^[11] La venta de *Ethyl* arrancó en febrero de 1923, durante las 500 Millas

¹ La adición de 1,2-dicloroetano y 1,2-dibromoetano fue una idea propuesta por Earl Bartholomew a partir de un hallazgo inicial de Thomas Boyd, colaborador de Midgley.^[17]



Figura 2. "Este vehículo necesita Ethyl". Cartel publicitario de Ethyl. Crédito: Saturday Evening Post, en G. Markowitz, D. Rosner, D. Deceit and denial. *The Deadly Politics of Industrial Pollution*. University of California Press, Berkeley, 2002, p. 31.

de Indianápolis. En lo que sería una estrategia de mercadeo inigualable, los ganadores de los primeros tres lugares de la carrera habían llenado los tanques de sus vehículos con Ethyl.^[18] La potencia impartida por Ethyl a los vehículos se convirtió en uno de los principales argumentos de venta que luego se usaron en los E.U.A. (Figura 2). Otro argumento aparecería al descubrirse que el TEP funcionaba como lubricante del asiento de la válvula de escape; sin el TEP, esta válvula sufría un desgaste abrasivo que causaba daños importantes en el motor.^[14]

Standard Oil, que poseía la patente de manufactura del TEP, y GM, que contaba con la patente de su aplicación como antidetonante, cofundaron en 1924 la Ethyl Gasoline Co. (en adelante, Ethyl, para designar a la compañía).^[18] Esta contrató a DuPont para que produjera el TEP en una unidad construida exprofeso en su planta de Deep Water, en Nueva Jersey. Standard Oil también producía TEP, aunque en menor cantidad, en una fábrica ubicada en Bayway, también en Nueva Jersey. Ethyl mezclaba el TEP con la gasolina en sus instalaciones de Dayton, Ohio.^[18]

Un "veneno rastrero y malicioso"

Desde la Grecia clásica y hasta la Revolución Industrial, las emisiones de plomo se debieron principalmente a la extracción de plata, cuya intensidad, a su vez, se correlaciona con periodos de auge económico, guerras, hambrunas y plagas.^[19] Existen papiros egipcios que relatan el envenenamiento con plomo con propósitos homicidas, así como descripciones de Hipócrates^[20] y de Nicandro^[21] (que datan ambas de antes de nuestra era) de dolencias atribuibles al plomo, en las que sin embargo no se reconocía su agente etiológico.^[6] Fue Dioscorides, en el primer siglo de la era presente, quien primero relacionó la exposición al plomo con sus efectos tóxicos.^[6,22] En el siglo XVI, después de varios siglos ausente de la literatura médica, el envenenamiento por plomo, también conocido como saturnismo, reapareció en la descripción de "la enfermedad del minero" realizada por Paracelso.^[6]

El plomo es un metal pesado que no se elimina del organismo con facilidad, por lo que es bioacumulativo. Se recomienda que sus niveles en sangre no superen los 10 µg/dL, aunque los valores menores a este umbral no están exentos de efectos tóxicos.^[23] En términos bioquímicos, el plomo presenta una alta afinidad por el grupo sulfhidrilo, y sustituye a cationes polivalentes como el calcio, el zinc y el magnesio, entre otros, en el metabolismo celular. Debido a lo anterior altera los canales iónicos de la membrana, y modifica la permeabilidad y la funcionalidad celulares. Afecta a proteínas como la calmodulina, que regula al calcio intracelular, así como a las enzimas involucradas en la síntesis del grupo hemo, lo que suele manifestarse como anemia; asimismo, altera la regulación inmunológica.^[24]

El plomo también es neurotóxico puesto que daña a los sistemas nerviosos central y periférico, tanto en etapas de desarrollo como en estado adulto. Las lesiones son promovidas por un incremento en la peroxidación de lípidos y una disminución de la actividad de enzimas antioxidantes.^[25] Los órganos hematopoyéticos (como la médula ósea), tracto gastrointestinal, riñones, hígado, pulmones, sistema óseo, bazo y prácticamente todos los órganos o tejidos pueden verse afectados por el plomo;^[25,26] de hecho, en cantidades lo suficientemente altas, es probable que afecte a todas las funciones biológicas.^[6]

Hoy sabemos que la exposición continua a bajas concentraciones de plomo se asocia con un incremento en el riesgo de tener diabetes tipo 2, hipertensión arterial, enfermedad renal crónica, daño cognitivo y retraso en el crecimiento infantil;^[22] a estos efectos se les llama subclínicos.^[27] Se ha señalado también una conexión entre los niveles de exposición crónica al plomo y la ocurrencia de delitos violentos,^[15] y que es posible que estos efectos neurológicos y conductuales sean irreversibles.^[28]

Los efectos subclínicos de la exposición al plomo eran desconocidos en las primeras décadas del siglo XX.^[27] No obstante, varios miembros del mundo académico de la época se opusieron al uso del TEP casi inmediatamente después del anuncio de su descubrimiento como agente antidetonante. Charles Kraus, de la Universidad de Potsdam, advirtió directamente a Midgley y a Kettering de las consecuencias

de usar este compuesto, al que llamaba “veneno rastrero y malicioso” por haber causado la muerte de un miembro de su comité doctoral.^[29] En octubre de 1922 William Mansfield Clark, bioquímico de la Universidad Johns Hopkins, escribió al Servicio de Salud Pública que “en las vías transitadas es muy probable que el óxido de plomo en polvo permanezca en la capa más baja de la atmósfera, y constituya una amenaza seria para la salud pública”.^[14] Esta preocupación era compartida por el Director General de Salud Pública de los E.U.A., quien solicitó pruebas de su inocuidad a GM. La compañía contrató a una dependencia oficial, la Oficina de Minas, que en ese entonces era la principal agencia de investigación de temas relacionados con los recursos mineros, para que hiciera estudios con animales en el otoño de 1923. En el contrato se estipulaba como prerrogativa de la empresa la aprobación de todo comentario o crítica que resultara de tales estudios antes de que se publicaran.^[14]

Siete trabajadores murieron entre los meses de septiembre de 1923 y 1924 en las fábricas de Dayton y de Nueva Jersey. Como más tarde reconocería DuPont, el proceso de manufactura del TEP era muy inseguro: los reactores funcionaban por lotes y al término de cada uno los operadores estaban expuestos a vapor altamente concentrado de plomo.^[29] El problema saltó a la opinión pública cuando, el 27 de octubre de 1924, en la planta de Standard Oil en Bayway, varios trabajadores fueran presa de espasmos musculares incontrolables, alucinaciones y delirios paranoicos tan violentos, que tuvieron que ser sometidos con camisas de fuerza. Cuando el primero de ellos murió en el hospital, el fiscal del distrito empezó una investigación. Al ser interrogado por la causa del accidente, el responsable de la planta negó que se debiera al TEP, y sugirió que “esos hombres probablemente perdieron la razón porque trabajaban demasiado”.^[18] Luego de terribles agonías, cinco trabajadores murieron en ese mes de octubre, tras lo cual la unidad en la que trabajaban comenzó a ser conocida como “el edificio del gas de chiflados” (*looney gas building*, en inglés). De igual manera, al lugar en donde se fabricaba el TEP en la planta de Deep Water de DuPont se le bautizó como “la casa de las mariposas”, por los manotazos que frecuentemente daban los trabajadores a los insectos voladores fruto de las alucinaciones causadas por el plomo.^[18,29] Según el *New York Times*, 300 trabajadores se habían vuelto psicóticos en “la casa de las mariposas”.^[18]

Estos hechos no debieron sorprender a Midgley, quien había sufrido dos explosiones en su laboratorio y un primer envenenamiento por plomo en el invierno de 1922.^[11] Sin embargo, el 30 de octubre de 1924, en una conferencia de prensa organizada por él mismo para convencer de la inocuidad de su creación, Midgley se untó TEP en las manos, se colocó una botella con el producto bajo la nariz, e inhaló sus vapores por un minuto. Terminó diciendo que “podría hacer esto cada día sin tener ningún problema de salud”, e insistió en que las intoxicaciones se debían a que los trabajadores no habían seguido correctamente las instrucciones de manejo del TEP.^[11] Al día siguiente, la Oficina de Minas publicó los resultados de su estudio, el cual concluía que, sobre la base de las pruebas con animales en jaulas abiertas, el peligro de que la población respirara plomo liberado por los escapes

de los automóviles era insignificante.^[11] Muy poco tiempo después de la conferencia de prensa, Midgley fue diagnosticado nuevamente con envenenamiento por plomo, del que le tomaría más de un año recuperarse.^[30] Ethyl reconocería 15 muertes debidas al TEP, lo que provocó que la planta de Bayway fuera clausurada a principios de noviembre de 1924, y que la venta de TEP se prohibiera en Nueva York, Nueva Jersey y Filadelfia.

Las alternativas al TEP

Antes y después del descubrimiento del TEP como antidetonante, el equipo de Midgley experimentó con el etanol, que producía el mismo efecto al mezclarse con la gasolina.^[31] No obstante, a diferencia del TEP, que bastaba agregar en una baja proporción (de dos a cuatro gramos por galón de gasolina) para evitar la detonación, el etanol y otros compuestos tales como el benceno debían representar entre 10% y 50% en volumen.

Las bondades del etanol como combustible eran conocidas por los fabricantes de automóviles desde antes de la Primera Guerra Mundial. Por ejemplo, el Modelo T de Ford, que poseía un motor de baja compresión, podía ajustarse para consumir gasolina, etanol o queroseno.^[31] Asimismo, en numerosos artículos de la prensa científica popular de la época se encuentran alabanzas al empleo de etanol como aditivo. Por ejemplo, en un artículo de *Scientific American* de 1918, se asentaba que:

Se ha establecido de modo definitivo que el alcohol [etílico] se mezcla con gasolina y produce un combustible de automóviles adecuado que previene las dificultades de arrancar un motor frío, como sucede usando solo alcohol [etílico], y sin ningún cambio en el carburador o en la compresión del motor.^[32]

En esos años también se veía a la eventual escasez de gasolina como una amenaza a la incipiente industria automotriz, por lo que la posibilidad de producir etanol de forma renovable lo volvía aún más atractivo. En 1917, la revista *National Geographic* consignaba las siguientes afirmaciones del inventor Alexander Graham Bell:

El alcohol [etílico] es un combustible hermoso, limpio y eficiente, que cuando no se destina al consumo humano, se produce muy económicamente... Se manufactura a partir de residuos de maíz, y de hecho casi de cualquier materia vegetal susceptible de fermentarse... No necesitamos temer el agotamiento de nuestras reservas de combustibles mientras podamos producir las cantidades anuales de alcohol [etílico] necesarias.^[33]

En memorandos internos de Ethyl, Midgley coincidía con lo anterior y aseguraba que el etanol era “incuestionablemente, el combustible del futuro”.^[11] En 1920 comisionó a su asistente T. A. Boyd para que se informara acerca de las investigaciones de un profesor de la Universidad de Yale

acerca de la hidrólisis de celulosa.^[29] A Midgley y a Boyd les pareció que esta alternativa no podría aplicarse en el corto plazo, y terminaron por descartarla cuando a finales de la década de 1920 se descubrieron nuevas reservas de petróleo en Texas y los precios disminuyeron.^[15]

En Europa, las escasas reservas de petróleo de varios países condujeron a que el interés por la producción de etanol y otros combustibles alternativos, así como por los motores pequeños y eficientes, se mantuviera muchos años después de la Primera Guerra Mundial.^[31] En cambio, la industria automotriz de los E.U.A. se concentró en los motores de alta compresión y potencia,^[14] y en el empleo del etanol como aditivo, más que como combustible.^[31] Una ventaja del empleo de la mezcla de gasolina con etanol era que no requería que se modificaran los motores diseñados para funcionar solo con gasolina. Por ello, en ese país se disponía de varias mezclas comerciales de gasolina con etanol.^[29] Mezclas similares eran bien conocidas en Europa, así como en Latinoamérica, y hacia 1925 se usaban rutinariamente en más de una veintena de países industrializados.^[29] En Francia, por ejemplo, era obligatorio adicionar etanol a la gasolina, mientras que en Irlanda, Suecia y Gran Bretaña esta práctica recibía beneficios fiscales.^[31] En los E.U.A. se comercializaban también mezclas de gasolina con butanol y con benceno. De hecho, Midgley y Kettering patentaron varias mezclas de este tipo, con las cuales no se presentaba el problema de la detonación.^[11]

El impulso a la gasolina adicionada con TEP vino sin duda de las enormes ganancias que reportaba. Por cada galón vendido de su producto, Ethyl recibía tres centavos de dólar; con solo contar con el 20% de las ventas de gasolina en los E.U.A., la compañía recibiría 60 millones de dólares anuales. Tras enumerar estos cálculos a Kettering en 1923, Midgley concluyó que “deberíamos ir tras el negocio tan pronto como podamos”.^[11] Para mantener este lucrativo negocio, los directivos de Ethyl mantuvieron una postura pública que negaba la existencia de aditivos alternativos al TEP. En un artículo publicado en abril de 1925, Midgley usaba argumentos como el siguiente:

El tetraetilo de plomo es el único material disponible que aporta estos resultados, que son de vital importancia para el uso público del automóvil, y a menos que exista un grave e inexcusable peligro en la manufactura del tetraetilo de plomo, su abandono no es justificable.^[34]

Así, en franca contradicción con sus memorandos internos y con las patentes que poseían, Ethyl se empeñaba en sostener que no había sustitución posible del TEP. Incluso, en ese mismo año de 1925, consiguieron la patente de una nueva mezcla a base de alcohol, benceno y un aditivo metálico no precisado, probablemente pentacarbonilo de hierro.^[31] Al poner el énfasis en el proceso de producción del TEP, Ethyl trataba de relanzar la producción y la venta de su producto con solo asegurar las condiciones de seguridad en sus plantas, negando las alternativas que conocían de sobra y por supuesto que la liberación de plomo a la atmósfera pudiera constituir un peligro de salud pública.

El “regalo del cielo”

En vista de los decesos ocurridos, el Director General de Salud Pública de los E.U.A. organizó una conferencia que tuvo lugar el 20 de mayo de 1925. Dado que no había precedentes regulatorios, la intención era encontrar evidencia incontrovertible de un riesgo serio e inmediato, que justificara posibles acciones contra la venta de *Ethyl*. Fueron convocadas cerca de una centena de personas, que podían agruparse en dos bandos: por una parte, los representantes de la industria, y por la otra, los expertos en salud pública.^[11,14] Los primeros se enfocaron en sostener falsamente, como se expuso antes, que el TEP no tenía sustitutos. Uno de los ejecutivos de Standard Oil, Frank Howard, llegó a afirmar que:

La civilización presente se basa en el petróleo y los automóviles... No consideramos justificado abandonar algo que ha llegado a la industria como un *regalo del cielo* con base en la posibilidad de que implique un riesgo.^[29,35]

Por su parte, los médicos y toxicólogos insistieron en que la toxicidad del plomo no era una posibilidad, sino un hecho establecido.^[29] El principal resultado de esta conferencia fue la conformación de un comité, integrado en su mayoría por médicos expertos, que empezó a trabajar en junio de ese año.

A partir de datos proporcionados por Ethyl, que indicaban que el 70% del plomo añadido a la gasolina permanecía en el motor, y que del resto, la mitad se quedaba en el aceite del cárter, el comité estimó que la exposición al plomo diaria derivada del tráfico vehicular sería de 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Dado que el valor límite de exposición laboral era de 0.5 a 1 mg/m^3 , en su informe de 1926 el comité concluyó que no había sustento para prohibir la venta de *Ethyl*, mas recomendó que se hicieran estudios adicionales y que se buscaran sustitutos al TEP.^[29] Ninguna de estas recomendaciones fue atendida, y la venta de *Ethyl* pudo relanzarse sin tropiezos en mayo de 1926 después de que se endurecieran las condiciones de seguridad en las plantas en donde se manufacturaba el TEP.

En los años subsecuentes las ventas de gasolina con plomo aumentaron en paralelo con el uso del automóvil. Esta empezó a venderse en Canadá en 1926, en Japón en 1927 y en Australia en 1932; en Cuba se introdujo algún tiempo antes de este último año.^[36] En Europa, Inglaterra comenzó a comercializar la gasolina con plomo en 1928, e Italia en 1935.^[36] Para 1936, *Ethyl* representaba el 90% de la gasolina vendida en los E.U.A., y el apoyo industrial al TEP había crecido tanto, que ese año la comisión de comercio de ese país prohibió cualquier crítica al TEP.^[37] También en 1936 arrancó la producción de TEP en una planta en Alemania, a la que seguirían otras en Francia (1938) y en Inglaterra (1940).^[36] Hasta la Segunda Guerra Mundial, el TEP se usó en los países europeos continentales principalmente como aditivo de combustible para aviación; para este propósito existían alternativas comerciales como el etanol, el metanol y el benceno, que se producían sobre todo en Francia y Alemania.^[36] En México, *Ethyl* comenzó a venderse en 1937, aunque las ventas se suspendieron en 1940 tras la nacionalización del petróleo y la rescisión de la patente.^[36,38] Ese

mismo año se construyó una planta de TEP cerca de Ciudad de México en la que se produjeron intoxicaciones letales y que tuvo que ser reconstruida en 1942 tras haber sido consumida por el fuego.^[38]

En 1925, Ethyl y el recién fundado Laboratorio Kettering contrataron a Robert Kehoe, profesor de fisiología en la Universidad de Cincinnati, para que estudiara los efectos de la exposición a la gasolina con plomo, que él mismo consideraba “válidos para ser investigados, aunque fueran hipotéticos”.^[14] A partir de la premisa errónea de que era natural encontrar el plomo en el organismo humano, Kehoe sostenía que había una línea precisa entre estar sano y padecer una intoxicación, que en adultos ocurría con niveles superiores a los 80 microgramos de plomo por decilitro de sangre.^[29] Sin que hubiera investigación independiente que sirviera como contrapeso, los resultados siempre *ad hoc* de Kehoe fueron considerados como los únicos válidos durante medio siglo y contribuyeron a que Ethyl justificara el empleo indiscriminado de este elemento tóxico. La patente del uso del TEP en gasolina expiró en 1947, lo que permitió que otras compañías además de Ethyl se dedicaran a su venta.²

La academia química norteamericana no dejó de respaldar a Midgley, quien en 1941 recibió la medalla Priestley, el más alto reconocimiento otorgado por la American Chemical Society por “sus hallazgos excepcionales en la ciencia química”,^[39] a los que en ese momento ya se había sumado el descubrimiento de los clorofluorocarbonos como gases de refrigeración.

Un geoquímico entra en acción

A finales de los años de 1940, Clair Patterson (véase Figura 3), geoquímico del Instituto de Tecnología de California, intentaba estimar la antigüedad de la Tierra a través de la medición de la velocidad a la que decae el uranio en plomo. Los análisis de Patterson se enfocaban en muestras de zirconio de las que conocía su edad, y por lo tanto también el contenido de plomo que el uranio debería haber producido, por el estrato geológico del que se habían extraído. Sin embargo, cada muestra que analizaba tenía más de 200 veces el valor esperado. Creyendo que las muestras se contaminaban en su laboratorio, estableció estrictos controles de limpieza en sus instalaciones y en sus análisis, los cuales le indicaron que la fuente de contaminación era la atmósfera.^[29] Gracias a estos controles, a partir del análisis del meteorito Canyon Diablo realizado en 1953, Patterson pudo calcular la edad de la Tierra en 4,550 millones de años, con un error de alrededor 70 millones de años. Los métodos de Patterson eran tan precisos que el valor considerado válido al día de hoy no es muy diferente (4,540 millones de años, con un error de 50 millones de años).^[40]

Patterson estaba convencido de que la ubicuidad del plomo era peligrosa, y se dedicó a demostrar la magnitud del



Figura 3. Clair Patterson en su laboratorio. Crédito de la imagen: *Caltech E&S Magazine* 1997, 60(1).

problema. Empleando sus técnicas analíticas de gran precisión, cuantificó el plomo a varias profundidades del océano Atlántico y del mar Mediterráneo y en la nieve de un valle rural en California, y tras analizar la composición de isótopos de plomo concluyó que su fuente era antropogénica.^[41] En un influyente artículo posterior, Patterson afirmó que las personas estaban siendo sometidas a un “ultraje crónico y severo de plomo”, y cuestionó que existiera un límite seguro de exposición a este elemento, como defendía Kehoe.^[42] Asimismo, fue pionero en el análisis de núcleos de hielo que pudieran datarse, y pudo determinar la concentración de plomo en muestras extraídas de Groenlandia que tenían antigüedades comprendidas entre el año 800 antes de nuestra era y 1965.^[43] Patterson y su equipo encontraron que la cantidad de partículas de plomo era mínima en la atmósfera del hemisferio norte antes de 1923, es decir, previamente a la entrada en el mercado de la gasolina con TEP; luego aumentaba hasta alcanzar, cuarenta años después, niveles 1,000 veces mayores.

En ese momento, en los albores del movimiento ambientalista, los estudios independientes acerca de la magnitud del problema del TEP se multiplicaban. En 1965 se reportó que la concentración típica de plomo atmosférico en las calles de Cincinnati y Los Ángeles era de 1.4 y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectiva-

2 El artículo de Gil Oudijk^[36] también presenta un recuento de las compañías que vendieron o produjeron TEP, así como los nombres comerciales de las gasolinas adicionadas con este producto.

mente; es decir, 100 veces mayor que las estimaciones del comité convocado por el Director General de Salud Pública en 1925. En las autopistas de alta velocidad se superaban los 20 $\mu\text{g Pb/m}^3$.^[44] Estos hallazgos y los de Patterson causaron inquietud entre la población y obligaron a las autoridades a actuar, de modo que en 1966 el comité ambiental del senado, de reciente creación, convocó a unas audiencias para discutir el uso del TEP. En ellas Robert Kehoe sostuvo que sus investigaciones habían demostrado que la gasolina con TEP no era un problema de salud pública, y que no había sustitutos para este aditivo. En respuesta, Patterson no solo puso en entredicho los experimentos de Kehoe,³ en los que se incluían a trabajadores de las plantas productoras de TEP como testigos negativos que confirmaban la supuesta "carga natural de plomo"; también arremetió contra las autoridades que permitieron que la industria tuviera poder de decisión en asuntos de salud pública.^[29]

La firmeza de Patterson contra el uso del TEP le valió que se le negara el apoyo a sus investigaciones, que su empleador fuera presionado por la industria petrolera para que lo despidiera, y que se le negara su participación en un panel nacional dedicado a la contaminación atmosférica con plomo.⁴ No obstante, la sólida investigación de Patterson contribuyó a que en 1970 la Agencia Ambiental de los E.U.A., creada ese mismo año, enmendara la Ley de Aire Limpio de 1963 para eliminar progresivamente la gasolina con TEP. Ethyl y DuPont demandaron a la agencia, con lo que postergaron una década más su uso en ese país.^[29]

Hacia 1969, 97.5% de la gasolina que se vendía en el mundo tenía TEP (en promedio, alrededor de 0.7 gramos por litro, aunque en países latinoamericanos como Bolivia, México, Paraguay o Venezuela contenía cerca de 1.2 gramos por litro).^[36] Al mismo tiempo, se disponía ya de gasolina sin plomo en Brasil, Japón y Austria.^[36] De hecho, en Brasil, donde se producía abundantemente etanol a partir de caña de azúcar, éste se usaba como antidetonante desde la década de 1940.^[36]

El advenimiento del convertidor catalítico contribuiría en gran medida a la eliminación del TEP de la gasolina.^[36,45] Este dispositivo reduce las emisiones de gases contaminantes como el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno, pero la gasolina con TEP lo dañaba.^[14,15] En 1973, la agencia ambiental de los E.U.A. exigió una reducción gradual en el contenido de plomo de la gasolina, que en ese momento alcanzó su valor máximo en ese país (0.6 gramos por litro), así como la instalación de convertidores catalíticos en los

automóviles nuevos. Estas regulaciones entraron en vigor en 1975, y condujeron a que una década más tarde prácticamente no se vendiera gasolina con TEP en los E.U.A. y el contenido promedio de plomo en la sangre de sus habitantes disminuyera 80%. Se ha estimado que, debido al empleo de este aditivo, se arrojaron siete millones de toneladas de plomo a la atmósfera entre 1975 y 1985, solo en ese país.^[14]

Países como Brasil, Eslovaquia, Suecia y Tailandia, dejaron de adicionar TEP a la gasolina antes del uso generalizado de los convertidores catalíticos.^[45] En 1967, la extinta Unión Soviética impuso las primeras prohibiciones a la venta de gasolina con plomo en algunas ciudades, como Moscú, Kiev y Odessa, entre otras; sin embargo, esto no se extendió al resto del país.^[46] Brasil empezó su programa de sustitución de la gasolina con plomo en 1975, y la producción a gran escala de etanol para vehículos que lo usaran exclusivamente como combustible, en 1980.^[47] Alemania fue el primer país europeo en imponer restricciones al contenido de plomo en la gasolina (0.4 g Pb/L) en 1972; la Unión Europea fijó este mismo límite en 1981.^[48] En 1984, Alemania introdujo la "gasolina sin plomo" (con un contenido máximo de 0.013 g Pb/L),^[49] y en 1988, Japón fue el primer país en eliminar por completo el uso del plomo en gasolina,^[36] seguido por Canadá, en 1990.^[45] En el Tratado de Aarhus, firmado en 1998 por prácticamente todos los estados miembros de la Unión Europea, la gasolina sin plomo se estableció como de uso exclusivo en el año 2005.^[48]

Conclusiones

La acumulación de evidencia acerca de los efectos negativos del plomo en la salud de niños y adultos condujo a que la Organización Mundial de la Salud estimara que la incorporación del TEP a la gasolina era el "error del siglo xx".^[50] En 1996, el Banco Mundial recomendó la eliminación global del TEP, lo cual fue anunciado en 2011 como un logro efectivo por parte de la Organización de las Naciones Unidas. El 30 de agosto de 2021 se anunció el fin de las reservas de gasolina con plomo en Algeria, que era el único país del mundo que seguía ofreciéndola en estaciones de servicio.^[51] Según el programa ambiental de esta organización, la prohibición mundial de la gasolina con plomo evitó dos millones de muertes tempranas y 58 millones de delitos.^[52]

Otros aditivos organometálicos, tales como el pentacarbonilo y el dicitropentadienilo de hierro (ferroceno), y el metilciclopentadienil manganeso tricarbonilo, han tenido un cierto uso en algunos países.^[36] Hoy, los aditivos oxigenados, que aumentan el contenido de oxígeno en la gasolina y reducen así las emisiones atmosféricas, tales como el éter metil *tert*-butílico (MTBE), el alcohol *tert*-butílico (TBA) (y por supuesto, el etanol y el metanol), son los más comunes, aunque su uso no está exento de problemas ambientales.^[36,53]

La historia del TEP muestra algunas de las razones que nos han conducido a la crisis ambiental presente. Para evitar que una historia semejante se repita, es indispensable regular y vigilar los avances tecnocientíficos por parte de autoridades gubernamentales que antepongan la salud de la población

3 Las visiones opuestas de R. Kehoe y C. Patterson acerca de la toxicidad del plomo se exponen con detalle en J. O. Nriagu, *Environ. Res* **1998**, *78*(2), 71-78.

4 Para quienes deseen conocer más la vida y obra de C. Patterson, se recomienda el capítulo "La habitación limpia", de la serie documental *Cosmos: una odisea del espacio*, transmitido en abril de 2014 por National Geographic Channel y presentado por Neil DeGrasse Tyson. También se sugiere National Academy of Sciences of the United States of America, "Clair Cameron Patterson", en: *Biographical Memoirs: Volume 74*, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, Washington, D. C., 1998.

a los beneficios de una minoría. Algunos científicos visionarios quisieron aplicar el principio precautorio al uso del TEP, mas no fueron escuchados. Este principio debe ser la guía indiscutible para las innovaciones que puedan socavar los cimientos de la vida en la Tierra.

Agradecimientos

La autora agradece al Dr. Eduardo Reyna Méndez sus constructivos comentarios al texto.

Referencias

- [1] P. Crutzen, *Nature* **2000**, 415, 23.
- [2] H. Trischler, *Desacatos* **2017**, 54, 40-57.
- [3] M. Svampa, *Utop. Prax. Latinoam.* **2019**, 24, 33-54.
- [4] Oxfam International **2020**, <https://www.oxfamintermon.org/es/publicacion/combatir-desigualdades-emisiones-carbono> (visitada el 25 de junio de 2021).
- [5] J. R. McNeill, *Something new under the sun: An environmental history of the twentieth-century world*, WW Norton & Company, New York, 2001.
- [6] S. Hernberg, *Am. J. Ind. Med.* **2000**, 38(3), 244-254.
- [7] G. Vázquez-Rodríguez, *Herreriana* **2015**, 11(2), 3-8.
- [8] A. P. Loeb, *Bus. Econ. His.* **1995**, 72-87.
- [9] T. Midgley, *Ind. Eng. Chem.* **1937**, 29(2), 241-244.
- [10] H. E. B. Viana, P. A. Porto, *J. Chem. Educ.* **2013**, 90(12), 1632-1638.
- [11] B. Kovarik, SAE Technical Paper **1994**, 941942.
- [12] T. Midgley, T. A. Boyd, *Ind. Eng. Chem.* **1922**, 14(10), 894-898.
- [13] C. Cooksey, *Sci. Prog.* **2012**, 95(1), 73-88.
- [14] J. O. Nriagu, *Sci. Total Environ.* **1990**, 92, 13-28.
- [15] C. G. Sarkar, *Orient. J. Chem.* **2020**, 36(1), 86-92.
- [16] R. C. Flagan, J. H. Seinfeld, *Fundamentals of air pollution engineering*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [17] D. Seyferth, *Organometallics* **2003**, 22(25), 5154-5178.
- [18] H. L. Needleman, *Environ. Res.* **1997**, 74(2), 95-103.
- [19] M. Fischetti, *Invest. Ciencia* **2021**, 532, 13.
- [20] Hipócrates de Cos, *Tratados hipocráticos. II, Sobre los aires, aguas y lugares*, Gredos, Madrid, 1986.
- [21] Nicandro de Colofón, *Alexifarmaka*, Moleiro, Barcelona, 1997.
- [22] M. L. Robles Osorio, E. Sabath, *Rev. Invest. Clin.* **2014**, 66(1), 88-91.
- [23] P. A. Poma, *An. Fac. Med.* **2008**, 69(2), 120-126.
- [24] A. Garza, H. Chávez, R. Vega, E. Soto, *Salud Ment.* **2005**, 28(2), 48-58.
- [25] C. Nava-Ruiz, M. Méndez-Armenta, *Arch. Neuroc.* **2011**, 16(3), 140-147.
- [26] T. D. Matte, *Salud Publ. Mex.* **2003**, 45(S2), 220-224.
- [27] R. A. Goyer, *Environ. Health Perspect.* **1990**, 86, 177-181.
- [28] Organización Mundial de la Salud **2019**, <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health> (visitada el 25 de junio de 2021).
- [29] W. Kovarik, *Int. J. Occup. Environ. Health* **2005**, 11, 384-397.
- [30] F. T. Edelmann, *Pap. Proc. Roy. Soc. Tasmania* **2016**, 150(1), 45-49.
- [31] W. Kovarik, *Automot. His. Rev.* **1998**, 32, 7-27.
- [32] Alcohol as an automobile fuel. *Sci. Am.* **1918**, July 6, Sect. A.
- [33] A. G. Bell, *Natl. Geog.* **1917**, February, 131.
- [34] T. Midgley, *Ind. Eng. Chem.* **1925**, 17(8), 827-828.
- [35] D. Rosner, G. Markowitz, *Am. J. Pub. Health* **1985**, 75(4), 344-352.
- [36] G. Oudijk, *Environ. Forensics* **2010**, 11(1-2), 17-49.
- [37] M. Z. Jacobson, *Atmospheric pollution: history, science, and regulation*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002, pp. 76-77.
- [38] J. C. Brown, A. Knight, *The Mexican Petroleum Industry in the Twentieth Century*, University of Texas Press, Austin, 1992.
- [39] American Association for the Advancement of Science, *Science* **1941**, 94(2437), 252-252.
- [40] University of Illinois Board of Trustees **2022**, <https://publish.illinois.edu/clair-patterson/clair-pattersons-early-life-and-research/> (visitada el 25 de enero de 2022).
- [41] M. Tatsumoto, C. C. Patterson, *Nature* **1963**, 199, 350-352.
- [42] C. C. Patterson, *Arch. Environ. Health* **1965**, 11, 344-360.
- [43] M. Murozumi, T. J. Chow, C. Patterson, *Geochim. Cosmochim. Acta* **1969**, 33(10), 1247-1294.
- [44] Public Health Service, *Lead in the atmosphere of three urban communities*. U.S. Department of Health, Education and Welfare, Cincinnati, 1965.
- [45] M. Lovei, *Phasing out lead from gasoline: World-wide experience and policy implications (No. 40)*, Environment Department, The World Bank, 1996.
- [46] V. M. Thomas, *Ann. Rev. Energ. Environ.* **1995**, 20(1), 301-324.
- [47] T. Nogueira, D. de Sales Cordeiro, R. A. Muñoz, A. Fornaro, A. H. Miguel, M. Andrade, "Bioethanol and Biodiesel as Vehicular Fuels in Brazil", en *Biofuels - Status and Perspective*, IntechOpen, 2015.
- [48] H. Storch, "Curbing the Omnipresence of Lead in the European Environment Since the 1970s: A Successful Example of Efficient Environmental Policy", en *Persistent Pollution – Past, Present and Future*, Springer, Cham, pp. 57-67, 2011.
- [49] H. Storch, M. Costa-Cabral, C. Hagner, F. Feser, J. Pacyna, E. Pacyna, S. Kolb, *Sci. Total Environ.* **2003**, 311(1-3), 151-176.
- [50] C. M. Shy, *World Health Stat. Quart.* **1990**, 43(3), 168-176.
- [51] United Nations Environment Programme **2021**, <https://news.un.org/en/story/2021/08/1098792> (visitada el 25 de febrero de 2022).
- [52] P. L. Tsai, T. H. Hatfield, *J. Environ. Health* **2011**, 74(5), 8-15.
- [53] T. M. Abdellatif, M. A. Ershov, V. M. Kapustin, M. A. Abdelkarrem, M. Kamil, A. G. Olabi, *Fuel* **2021**, 291, 120112.