

CONVIVIR CON EL PLOMO

Un aprendizaje necesario

Facultad de Ciencias

Autores

Andrés Ansin

Santiago Botasini

Eduardo Méndez

COMISIÓN SECTORIAL DE EDUCACIÓN PERMANENTE



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

ÁREA DE LAS TECNOLOGÍAS Y
CIENCIAS DE LA
NATURALEZA Y EL HABITAT

TN

CONVIVIR CON EL PLOMO

Un aprendizaje necesario

Autores

Andrés Ansin

Santiago Botasini

Eduardo Méndez



Rector de la Universidad de la República: Licenciado Rodrigo Arim

Pro. Rector de Enseñanza: Doctor Juan Cristina

Comisión Sectorial de Educación Permanente (CSEP)

Doctora Beatriz Brena (Presidente) / Magíster Ingeniero Agrónomo Mario Jaso (Director de la Unidad Central de Educación Permanente - UCEP) / Doctora María Cristina Cabrera (Área Tecnologías y Ciencias de la Naturaleza y el Hábitat) / Magíster Licenciada Gabby Recto (Área Salud) / Licenciado (Ph.D.) Javier Taks (Área Social y Artística) / Magíster Mario Piaggio (Orden Egresados) / Magíster en Ciencias Sylvia Corte (Orden Docente) / Arquitecta Helena Heinzen (Centros Universitarios del Interior) / Arquitecto Roberto Langwagen (Secretaría)

Decana del servicio al que pertenece la publicación: Doctora Dra. Mónica Marín

Encargada de Educación Permanente del servicio: Magíster Paula Tucci

Responsable académico de la publicación: Doctora Beatriz Álvarez

Autores de la publicación: Andrés Ansin / Doctor Santiago Botasini / Doctor Eduardo Méndez

Evaluadores externos de la publicación: Doctor Moises Knochen / Doctora Mariela Pistón

Diseño Gráfico Original:

Claudia Espinosa / Arquitecto Alejandro Folga / Arquitecta Rosario Rodríguez Prati

Corrección de estilo: Natalia Chiesa

Puesta en página: Licenciada Andrea Duré

Fecha de publicación: Agosto de 2022

Cantidad de ejemplares: 200

ISBN: 978-9974-0-1927-0

ESTA PUBLICACIÓN FUE FINANCIADA POR LA
COMISIÓN SECTORIAL DE EDUCACIÓN PERMANENTE

EDITADA POR EDICIONES UNIVERSITARIAS
(Unidad de Comunicación de la Universidad de la República – UCUR)

| | |
|---|----|
| AGRADECIMIENTOS | 9 |
| PREFACIO <i>Andrés Ansin, Santiago Botasini, Eduardo Méndez</i> | 11 |
| SOBRE LOS AUTORES..... | 13 |
| INTRODUCCIÓN..... | 15 |
| CAPÍTULO 1. PERSPECTIVA HISTÓRICA Y CONSIDERACIONES CONTEMPORÁNEAS | 17 |
| 1.1. Los usos del plomo: una historia muy antigua | 18 |
| 1.2. Primeros indicios de la toxicidad del plomo | 24 |
| 1.3. El plomo en el arte: la paleta mortal de los grandes maestros | 26 |
| 1.4. El plomo en la era del consumo: propaganda y ocultamiento | 32 |
| 1.5. La lucha contra la desinformación: los fantasmas del doctor Stockmann | 35 |
| CAPÍTULO 2. EL PLOMO EN LA SALUD Y EN LA ENFERMEDAD | 43 |
| 2.1. El saturnismo: una historia de dioses y muerte | 44 |
| 2.2. ¿Por qué el plomo nos contamina? | 46 |
| 2.3. Una bacteria que puede vivir en presencia del plomo, ¿cómo lo logra? | 47 |
| 2.4. ¿Cómo ingresa el plomo a nuestro cuerpo? | 48 |
| 2.5. ¿Por qué es tóxico el plomo?..... | 49 |
| 2.6. Prevención y mitigación con la dieta..... | 52 |
| CAPÍTULO 3. EL PLOMO HOY: ENTRE EL CONTROL Y EL DESCONTROL..... | 53 |
| 3.1. Efectividad de las acciones globales: caminos cumplidos y en tránsito | 53 |
| 3.2. Las perovskitas de plomo: ¿creando futuros problemas? | 56 |
| 3.3. El plomo en el ambiente laboral..... | 57 |
| 3.4. El plomo en el hogar | 58 |

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 4. TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN Y CUANTIFICACIÓN DEL PLOMO EN PINTURAS..... | 61 |
| 4.1. La descentralización analítica como respuesta | 61 |
| 4.2. Métodos analíticos convencionales | 64 |
| 4.3. Métodos centralizados de laboratorio | 71 |
| 4.4. Trabajo en campo: detección de plomo en hogares de Montevideo y Canelones..... | 73 |
| | |
| CAPÍTULO 5. LEGISLACIÓN, ENSEÑANZA Y DIVULGACIÓN | 77 |
| 5.1. Legislación vigente..... | 78 |
| 5.2. Enseñanza | 81 |
| 5.3. Divulgación..... | 83 |
| | |
| CONCLUSIONES GENERALES | 87 |
| | |
| BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS..... | 89 |

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Sectorial de Educación Permanente de la Facultad de Ciencias, al licenciado Federico de León y la doctora Silvana Masciadri, por sus aportes, sugerencias y apoyo durante la realización del curso, así como la escritura de este libro.

A todos los integrantes actuales y pasados del Laboratorio de Biomateriales de la Facultad de Ciencias: la doctora María Fernanda Cerdá, la doctora Paula Enciso y la licenciada Laura Luzuriaga. Una mención especial a los estudiantes de tesinas y tesis en los temas afines, y a los colaboradores en los diferentes proyectos: el doctor Pablo Tancredi y los másteres en Ciencias Aldana Grimaldi, Gonzalo Heijo y Giovanni Gallietta. A la doctora Beatriz Álvarez, del Laboratorio de Enzimología de la Facultad de Ciencias, por la revisión del capítulo de bioquímica. A los profesores doctor Moisés Knochen y doctora Mariela Pistón, por la evaluación crítica del manuscrito borrador y las sugerencias y correcciones.

A los ministerios de Salud Pública y de Industria, Energía y Minería, a la Unidad Pediátrica Ambiental de la Facultad de Medicina-Administración de los Servicios de Salud del Estado, a la institución El Abrojo y a la Intendencia de Montevideo, por el apoyo en las diferentes etapas de las investigaciones realizadas a lo largo de estos años. Al Instituto Crandon y a las profesoras Ana María Méndez, Gabriela Meroni, Ana Pastore, Cecilia Quintans y Gabriela Varela, por su trabajo innovador junto con los estudiantes de tercer año de liceo en una experiencia piloto llevada a cabo en plena pandemia. A la Foundation of Researchers in Science and Technology of Materials, por la invitación para compartir nuestros estudios en un evento en la ciudad de Cúcuta, Colombia, en 2019, y la organización del curso virtual dictado para Colombia en 2021.

El curso de Educación Permanente fue financiado por el programa homónimo de la Comisión Sectorial de Investigación Científica (CSIC) en 2019. Las investigaciones que dieron sustento al curso de Educación

Permanente fueron financiadas por la CSIC-Sector Productivo (2009-2011), la CSIC-Inclusión Social (2011-2013; 2020-2022), la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) y el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (2012-2015), la ANII-Innovación Inclusiva (2016-2019) y el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas-Química.

PREFACIO

El presente libro resume nuestra experiencia en el dictado del curso de Educación Permanente Valoración de la Presencia de Plomo en el Ambiente Laboral y en el Hogar mediante Técnicas Descentralizadas, entre los años 2019 y 2021, en diferentes departamentos de Uruguay y, en su extensión en forma virtual, para Colombia. El interés surge en el Laboratorio de Biomateriales de la Facultad de Ciencias hace más de once años, cuando comenzamos a desarrollar la línea de investigación sobre descentralización analítica, que incluye el uso de técnicas portátiles y a ojo desnudo para la detección de diversos contaminantes. Pronto apareció la necesidad de incluir al elemento plomo en las investigaciones, no solo por ser un reconocido contaminante y con antecedentes en nuestro país que generaron un importante impacto social, sino también porque la tendencia mundial mostraba que la detección del plomo debía realizarse dentro de los hogares, lo cual constituía un desafío analítico importante. Por otra parte, la inevitabilidad de la convivencia con el plomo va de la mano con la necesidad de concientización de la población, aspecto que, como siempre, resulta ser el más difícil de llevar a cabo. La modalidad de Educación Permanente y la edición del presente libro constituyen excelentes alternativas que la Universidad de la República promueve para cumplir con ese objetivo.

El impacto que tuvo el reconocimiento de la presencia del plomo en el barrio La Teja a fines de la década del noventa y todo lo que trajo asociado (los estudios científicos, la legislación, la coordinación institucional y el empoderamiento del barrio en la generación de soluciones) fueron recogidos por dos libros: *Plomo, salud y ambiente. Experiencia en Uruguay* (Burger y Pose Román, 2010) y *Life without Lead. Contamination, Crisis, and Hope in Uruguay* (Renfrew, 2018).

La necesidad de divulgar la problemática a un público amplio nos llevó a diseñar un curso en el que la temática del plomo abarcara diferentes aspectos, desde los ecotoxicológicos hasta los bioquímicos, pasando por

su uso por diferentes civilizaciones humanas, incluido su empleo extendido en el arte. De esta manera, el contenido de este libro puede ser usado en forma parcial o total, dependiendo de la población objetivo y de sus intereses. Entendemos que la inclusión de la historia, la mitología y el arte ayudarán a enfocar el tema desde un punto más humano, acompañando el desarrollo de las civilizaciones hasta la actualidad. Por otra parte, las implicaciones sociales y jurídicas del tema permiten agrandar el abanico de disciplinas, de manera que la temática no quede centrada exclusivamente en los aspectos químicos o bioquímicos.

El libro está organizado en varios capítulos: comienza por una revisión histórica, que nos permite entender por qué el plomo está tan presente en nuestra vida cotidiana; luego se adentra en aspectos técnicos y, finalmente, en los pasos que se han realizado y en los que se seguirá trabajando para minimizar su impacto negativo y así aprender a convivir con el contaminante. Incluiremos diferentes aspectos que van desde el arte y la industria de los juguetes hasta el peligro de lo *vintage* en la decoración, pasando por los aspectos bioquímicos de la contaminación y las consecuencias en la salud, los ensayos analíticos en el campo y en el laboratorio. Algunos análisis de situaciones de contaminación reales nos permitirán evaluar las soluciones jurídicas y los aspectos éticos del problema. Finalmente, hemos hecho un especial énfasis en los aspectos educativos y de difusión de la problemática hacia la población, con una mirada enfocada en la educación de los jóvenes como agentes divulgadores en el hogar.

En suma, buscamos informar a la población sobre los aspectos generales de la contaminación por plomo, incorporando una visión amplia acerca de este contaminante, que inevitablemente nos rodea, y así conocer, de forma justificada, cómo evitar que ingrese a nuestro organismo. Solo aprendiendo a convivir con el plomo podremos enfrentar y prevenir sus peligros.

*Andrés Ansin
Santiago Botasini
Eduardo Méndez*

Montevideo, julio de 2021

SOBRE LOS AUTORES

Andrés Ansin es licenciado en Bioquímica de la Universidad de la República (Udelar). Se incorporó al trabajo que se estaba llevando a cabo en el Laboratorio de Biomateriales sobre el desarrollo de métodos descentralizados de análisis de plomo y participó activamente en los trabajos de medida en campo de la presencia de plomo en hogares. Es autor principal de dos publicaciones sobre el tema en revistas arbitradas y de numerosas presentaciones en congresos nacionales e internacionales sobre el asunto. Dirige un proyecto de extensión (Comisión Sectorial de Extensión y Actividades en el Medio, Udelar) sobre la presencia de plomo en artículos de cosmética. Integró el plantel docente que dictó el curso de Educación Permanente.

Santiago Botasini es licenciado en Bioquímica y doctor en Química por la Udelar, asistente del Laboratorio de Biomateriales e investigador del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) (nivel I) y el Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (Pediciba) (grado 3). Ha realizado pasantías de investigación en las universidades de Karlsruhe (Alemania), Murcia (España) y Maryland (Estados Unidos). Sus investigaciones se han centrado principalmente en el desarrollo de nanosistemas ópticos para la detección de contaminantes y en la creación de sistemas electroquímicos de análisis descentralizados. Es autor de 20 trabajos en revistas arbitradas en el área analítica y de nanotecnología, y revisor de varias publicaciones internacionales. Integró el plantel docente que dictó el curso de Educación Permanente.

Eduardo Méndez es químico y doctor en Química por la Udelar, profesor agregado y corresponsable del Laboratorio de Biomateriales, e investigador del SNI (nivel II) y el Pedeciba (grado 4). Ha realizado pasantías de investigación en las universidades de Chile, Karlsruhe y Ulm (Alemania), y Puerto Ordaz (Venezuela). Sus investigaciones actuales se focalizan en el desarrollo de sistemas analíticos descentralizables (nanotecnológicos y electroquímicos) y en la caracterización de bioma-

teriales. Es autor de 60 publicaciones en revistas arbitradas y ha sido responsable de 15 proyectos de investigación. Ha sido revisor para una treintena de publicaciones internacionales y un centenar de proyectos para programas de financiación de Uruguay, América Latina y Europa. Ha dictado conferencias en varios eventos internacionales sobre el tema del plomo y su impacto social. Ha dirigido cuatro tesis de posgrado y una decena de tesis de grado en Bioquímica. Integró el plantel docente que dictó el curso de Educación Permanente.

INTRODUCCIÓN

Más que vivir sin plomo, debemos aprender a convivir con el plomo. Esta es la conclusión a la que arribaremos al final de este libro, pero conviene tenerla presente desde el comienzo, para entender cómo lo hecho con anterioridad por la especie humana determina la situación actual.

El plomo acompañó el desarrollo de las civilizaciones desde sus orígenes, debido a las propiedades ventajosas que este ofrecía. Desde la elaboración de utensilios, los diseños estéticos, el endulzamiento del vino, el uso de aditivos antidetonantes de los combustibles, la integración a las paletas de los grandes maestros de la pintura hasta la elaboración de los cristales, el plomo siempre ha estado allí, jugando un papel fundamental.

Para que la especie humana pudiera hacer uso del plomo en todas estas aplicaciones, tuvo que arrancarlo de sus depósitos originales, donde formaba parte de minerales estables. Una vez que se separó al plomo de allí, comenzó a dispersarse por los suelos, los mares, el aire; se convirtió en un problema mundial, y hasta se lo considera responsable de la primera pandemia que sufrió la especie humana. El plomo quedó suelto, ya no está más en sus depósitos originales. Sin ningún mecanismo específico para lidiar con él, resulta ser un poderoso tóxico para el que nuestro cuerpo no está preparado. ¿Qué se puede hacer entonces?

Hay mucho que se puede hacer a nivel mundial, y, de hecho, una buena parte ya se hizo: eliminar el uso innecesario de plomo, como en los combustibles, las pinturas del hogar y los utensilios, y establecer controles sanitarios adecuados que ayuden a la prevención y la mitigación de intoxicaciones. Pero uno de los aspectos fundamentales es reconocer que el plomo está entre nosotros y que debemos aprender a convivir con él para evitar contaminarnos. Para ello, es necesario informar, educar y no alarmar. Este libro busca cubrir estos aspectos, para que todos sepamos cómo cuidarnos.

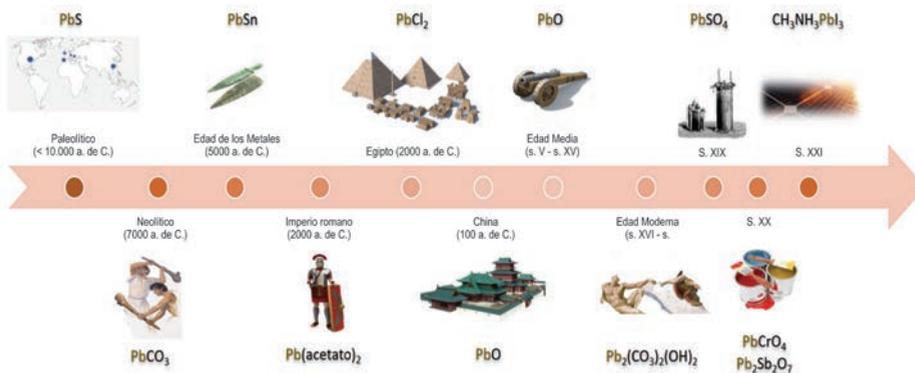


Perspectiva histórica y consideraciones contemporáneas

El plomo en la naturaleza se encuentra en depósitos minerales de galena (sulfuro de plomo, PbS), asociado a los depósitos de plata. Se estima que los primeros usos del plomo por el ser humano se remontan al período neolítico, de acuerdo con el descubrimiento de artefactos de plomo y de pigmentos producto de sales de plomo, datadas aproximadamente del 7000 a. de C. Esto sugiere que el uso de este metal precede, incluso, a la explotación del cobre, el cual es de extrema importancia en la fabricación de las primeras herramientas agrícolas. En esa época, el plomo metálico era obtenido como producto de la extracción de otros metales como la plata, a través de la formación de una aleación de plata-plomo que luego podía ser separada por un proceso denominado *copelación* (Craddock y Lang, 2003). Ya desde sus inicios el plomo tuvo una variedad de aplicaciones tanto en su forma metálica como en forma de sales y óxidos. En este período se destaca, entre sus principales usos, la fabricación de cunetas funerarias, piezas en forma de T utilizadas para estabilizar estructuras de piedra y pigmentos para el coloreado de diversas superficies (Lessler, 1988).

El plomo ha ido acompañando a las diferentes civilizaciones, de la mano de los avances iniciados con el uso del fuego y seguido por el desarrollo y uso de herramientas. Desde el punto de vista químico, en las diferentes épocas, los compuestos de plomo empleados fueron cambiando (figura 1).

Figura 1. Línea de tiempo que indica el uso del plomo y de sus diferentes compuestos por las distintas civilizaciones humanas, desde el origen de estas hasta la actualidad



1.1. Los usos del plomo: una historia muy antigua

A pesar de que en la literatura referente a la historia del plomo prevalece un enfoque eurocentrista, su uso puede rastrearse en un considerable número de civilizaciones alrededor del globo que lo descubrieron independientemente (Moorey y Moorey, 1994; Scott y Meyers, 1994). Un primer ejemplo lo constituye la extracción y el uso de la galena por tribus norteamericanas antes de la llegada de los europeos a América. Su uso extendido quedó asociado a lo que se considera la primera contaminación por plomo conocida en Norteamérica, ocurrida en las planicies del río Misisipi en el 300 a. de C., entre otros epicentros de contaminación, como las inmediaciones de los ríos Ohio y Misuri (Bird *et al.*, 2019).

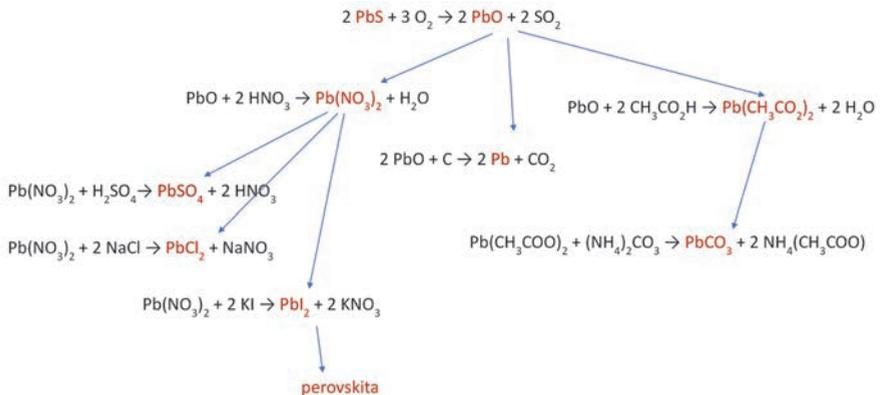
Es durante la Edad de Bronce que el uso del plomo comienza a verse mejor representado en los artefactos históricos. Incluso, la aleación de cobre y estaño que da nombre a este período histórico contenía entre un 8 % y un 35 % de plomo, una cantidad demasiado alta para ser producto de alguna contaminación o inclusión inadvertida, por lo que probablemente se agregara intencionadamente para mejorar las propiedades de la aleación resultante (Gowland, 2011). Asimismo, pese a que la fragilidad del plomo lo hace poco atractivo para la fabricación de armas, el desarrollo de armamento basado en bronce no perdió de vista al plomo. No era raro encontrar balines de plomo utilizados a modo de munición para hondas (Gowland, 2011). El paralelismo entre estos artefactos y las balas modernas (también compuestas, en muchos casos,

de plomo) no sorprende, dado que un proyectil con mayor densidad impactará con mayor fuerza.

Estas aplicaciones primitivas no solo fueron las primeras instancias constatadas del uso del plomo, sino que también representan los primeros ejemplos de sus consecuencias en la salud. En efecto, el registro de muertes asociadas a la minería de plata y galena puede verse en las primeras escrituras con letras cuneiformes,¹ así como en jeroglíficos egipcios que se remontan a los orígenes de la escritura. Por ejemplo, algunos instructivos correspondientes a ese mismo período recomiendan que el ganado no pastoree cerca de las minas de las que se extraía el material, debido a los problemas de salud que le ocasionaban (Lessler, 1988).

A medida que la humanidad se adentra en la Antigüedad, el uso del plomo se hace cada vez más prominente, así como la variedad de compuestos de plomo involucrados (figura 1). Esta tendencia responde al surgimiento de nuevas aplicaciones, pero también al refinamiento de otras ya existentes. Las transformaciones entre los compuestos de plomo a lo largo de la historia se basaron en reacciones simples, promovidas principalmente por la temperatura y el oxígeno (figura 2).

Figura 2. Reacciones químicas que interconectan los diferentes compuestos de plomo, desde los encontrados en los yacimientos hasta los sintéticos



Fue también en el mundo grecorromano que se descubrió otra propiedad del plomo con un gran impacto en el ámbito culinario. Al hervir vino acidificado en urnas hechas a partir de este metal, se producía acetato de plomo en forma de un jarabe muy dulce llamado *sapa*, que era utilizado en diferentes proporciones para endulzar vinos. La *sapa* tuvo muchí-

1 La escritura cuneiforme es la forma de escritura más antigua conocida por el ser humano, surgida en el Oriente Medio en el 3000 a. de C.

sima popularidad en toda la extensión geográfica del Imperio romano, ya que persistió hasta finalizada la Edad Media, cuando su uso comenzó a ser regulado. Incluso, el plomo como edulcorante de bebidas alcohólicas puede rastrearse hasta el siglo XIX (Lessler, 1988). Las concentraciones de plomo en estas bebidas eran tales que los efectos eran más similares a las intoxicaciones agudas que a las crónicas.

1.1.1. MAQUILLAJE

Como ya mencionamos, el uso de sales de plomo coloreadas existe desde el período neolítico, pero la encarnación más famosa de esta técnica tuvo lugar en Egipto en el 2000 a. de C. Esta civilización utilizó maquillajes faciales impactantes con fines religiosos o simplemente estéticos (Christiansen *et al.*, 2020), y el uso generalizado de pigmentos sobrevive plasmado de forma pictórica en papiros, murales y piezas artísticas. El kohl es un cosmético elaborado a base de galena molida, empleado en el antiguo Egipto para oscurecer los párpados y como máscara de ojos, y se incluía en largos tubos en los ajuares funerarios (figura 3a). Aún en la época contemporánea, su uso era muy extendido entre las actrices del cine mudo que se agruparon bajo la denominación *vampiresas*, entre las que Theda Bara (figura 3b) fue una de sus mayores exponentes (Paskin, 1992).

Figura 3a. Aplicador de kohl encontrado en Egipto (ca. 1550-1295 a. de C.); la imagen corresponde a una pieza expuesta en el Museo Metropolitano de Arte, de Nueva York (Estados Unidos), subida a Archive.org por Jeff Kaplan el 28 de febrero de 2014

Figura 3b. Theda Bara, actriz estadounidense fallecida de cáncer abdominal a los 69 años, fue una destacada exponente de las vampiresas del cine mudo, que utilizaban kohl en los párpados y el entorno de los ojos para acentuar su mirada enigmática



3a



3b

La detección de otros compuestos en los maquillajes permitió establecer no solo el origen natural de alguno de ellos, sino también su origen sintético. Por ejemplo, la cerusita (PbCO_3) provenía de fuentes naturales en Egipto, pero era sintetizada en Grecia, mientras que la fosgenita ($\text{Pb}_2\text{Cl}_2\text{CO}_3$) era producida artificialmente (Beck *et al.*, 2018). La síntesis intencionada para usos específicos sugiere que pueda tener fines medicinales, principalmente por la presencia de la fosgenita y la laurionita ($\text{Pb}(\text{OH})\text{Cl}$), que al ser compuestos ligeramente solubles en agua (véase la tabla 2) liberan una cantidad de iones plomo (II) suficiente para producir una respuesta inmunológica (vía aumento del estrés oxidativo) que pueda combatir las infecciones bacterianas (Tapsoba *et al.*, 2010). Recientemente, un estudio sobre los papiros egipcios arrojó un resultado por demás interesante. Mediante el uso de potentes técnicas espectroscópicas, los investigadores pudieron hacer estudios muy detallados acerca de la composición química de los pigmentos en los papiros, que revelaron que los compuestos de plomo se encontraban diseminados en toda la extensión del papiro, independientemente del color del trazo. En otras palabras, los compuestos de plomo no serían los responsables del color en este caso, por lo que se piensa que habrían sido utilizados como agentes de secado de la pintura más que como pigmentos (Christiansen *et al.*, 2020), una propiedad muy buscada en el desarrollo de pinturas y que significó el uso de compuestos de plomo hasta mediados del siglo XX.

1.1.2. MONEDAS

Además de su uso en pigmentos, el plomo ocupó un lugar central en la historia a través de la manufacturación de monedas. En la antigua Asia, por ejemplo, se comenzó a utilizar aleaciones de plomo y estaño para la fabricación de monedas en el año 1 a. de C. (Pollard, 1986). Muchos años después, durante la dinastía Sung en China (ca. 1000 d. de C.), el bronce emplomado era ampliamente utilizado para la confección de monedas (Misner, Boats y Benvenuto, 2007). En este tipo de bronce, la proporción clásica de cobre/zinc o cobre/estaño de 2 a 1 es alterada por el agregado de plomo en cantidades tales que supera la proporción clásica. Es posible que se haya utilizado el plomo gracias a su resistencia a la oxidación y a su densidad, que permite hacer monedas de un peso adecuado utilizando relativamente poco material.

1.1.3. CAÑERÍAS

Es imposible hablar del plomo en la Antigüedad sin detenernos en Roma. En su momento los romanos fueron los principales extractores de este metal, quienes lograron niveles de plomo atmosférico que no se volverían a ver hasta la revolución industrial (Hong *et al.*, 1994; Martínez-Cortizas *et al.*, 1997). A modo de comparación, el 40 % de la extracción de plomo durante el siglo II fue realizado exclusivamente en Hispania, en minas controladas por el Imperio romano (Nriagu, 1983b). Entre los múltiples avances tecnológicos que permitieron la expansión romana, uno de ellos fue, sin duda, el saneamiento y la capacidad de transporte de agua a través de cañerías y acueductos. Su maleabilidad, así como la resistencia a la corrosión, hace que este metal sea ideal para la construcción de tubos para el transporte de agua (Nriagu, 1983a). Obviando los efectos nocivos para la salud, el plomo es tan idóneo para esta tarea que es común encontrar aún hoy en día cañerías hechas de este material. Pese a que esta herencia romana está intentando ser erradicada, sus efectos persisten en las poblaciones que mantienen este sistema de saneamiento (Mielke, 1999).

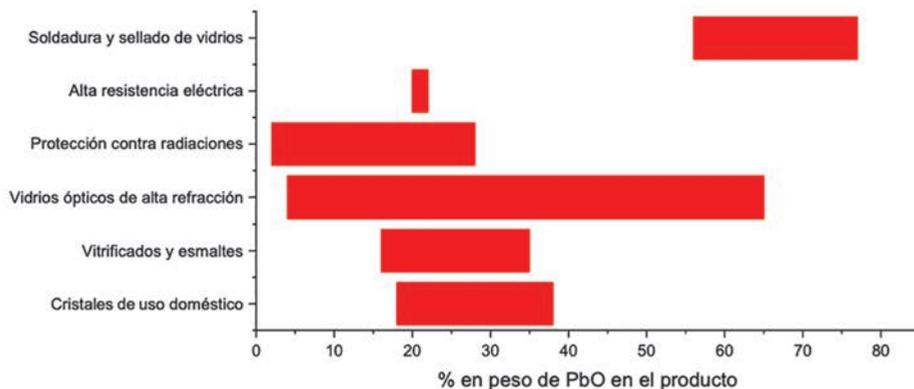
1.1.4. VIDRIERÍA

Por el año 100 a. de C. surgió, simultáneamente en Roma y en China, el proceso alfarero que permite obtener la cerámica vidriada, que parte de vasijas de arcilla o barro que son sometidas a calor y recubiertas con un esmalte a base de plomo. Esta tecnología se esparció al resto del viejo mundo a lo largo de la Antigüedad (Tite *et al.*, 1998), ya que ofrecía varias ventajas que permitían fabricar piezas de gran belleza y resistentes al agua, ideales para su uso como vajillas. Desafortunadamente, permitió que los casos de intoxicación con plomo se masificaran aún más. La caída del Imperio romano y el comienzo de la Edad Media marcaron el primer descenso en los niveles ambientales de plomo desde el neolítico. Sin embargo, esto no significa que el plomo se ausentara de la innovación tecnológica de la época, puesto que en este período entró en escena la tan popular cristalería de plomo. Estrictamente hablando, la fabricación de vidrio data de, al menos, el tercer milenio antes de Cristo. No obstante, esta producción era muy limitada y no adquirió una escala considerable hasta los siglos XIV y XV a. de C. en Siria y Mesopotamia (Moorey y Moorey, 1994). En otras culturas también se elaboraron cristales de plomo de forma independiente. Un ejemplo es China, que durante la dinastía Han (206 a. de C. - 220 d. de C.) generó un vidrio de plomo que imitaba la apariencia del jade (Tait, 2004).

Independientemente de la época, el vidrio siempre fue una mezcla de sílice con otras sustancias que reducían su temperatura de fusión y mejoraban las propiedades del producto final (Berke, 2007; Brill, Martin y Glass, 1991). Pero, cuando el plomo es utilizado en conjunto con el sílice, se obtienen propiedades ópticas muy deseables, así como una blandura que simplifica el trabajo con el cristal tanto en su forma líquida como sólida (Hynes y Jonson, 1997). Durante la Edad Media europea hubo un fuerte interés en la extracción de plata, lo que dejó una gran cantidad de óxido de plomo (PbO) como subproducto, que se empleó intensivamente para la elaboración de cristales (Wedepohl y Baumann, 1997). Más tarde, esta tecnología sería retomada para producir cristalería fina, que se mantendría en circulación hasta finales del siglo XX, cuando los riesgos del plomo en estos artefactos serían reconocidos a nivel legal. Los famosos cristales de Murano son una de las imágenes más evocativas del aprovechamiento de este material, por sus colores y formas impactantes (Vose, 1980). Ninguna de estas piezas de arte hubiese sido posible sin las propiedades del plomo. Las técnicas modernas logran, hasta cierto punto, replicar lo que antes hubiese requerido de este metal tóxico, pero el valor de las originales no debe despreciarse. Para quienes tengan la suerte de tener estas piezas en sus hogares (u otras formas de cristal de plomo), beber de ellas no está recomendado; no obstante, no dejan de ser valiosas piezas de exposición.

El uso de plomo en material vitrificado no se limita a la elaboración de elementos de cristalería. Dependiendo de la cantidad de PbO presente, se logran propiedades del vidrio que son aprovechadas en diferentes productos (figura 4).

Figura 4. Usos del PbO en diferentes objetos, para aportar propiedades específicas. Figura elaborada a partir de datos publicados en el artículo (Shackelford y Doremus, 2008)



1.2. Primeros indicios de la toxicidad del plomo

Los registros de personas con cólicos, parálisis de los movimientos peristálticos, vómitos, fiebres y falta de energía se extienden desde la Antigüedad, pasando por la Edad Media, hasta el Renacimiento. Así, se generaron muchas enfermedades con distintos nombres según el lugar y el período histórico. Algunas de estas misteriosas enfermedades pasaron a la historia por la gravedad con la que afectaban a los individuos de una región; solo algunos ejemplos son la *colica pictonum*, la *Grimmen* alemana, la enfermedad de Devonshire y la *dry belly-ache* norteamericana.

Aunque algo controversial en su momento, la idea de que la caída del Imperio romano fue ocasionada por el consumo de plomo (Nriagu, 1983b) fue ampliamente considerada por la comunidad científica (DeLile *et al.*, 2017). La hipótesis era que el consumo de vino contaminado y el uso de cañerías de plomo llevaron a una intoxicación de los líderes del imperio, que, sumada a los problemas neurológicos asociados al plomo, ocasionó el decaimiento de esa civilización (Gilfillan, 1965). De hecho, existen extensos reportes que hablan de lo común que era para los dirigentes romanos tener que adoptar infantes a causa de su reducida fertilidad. Estos problemas reproductivos, sumados a la baja esperanza de vida, también son consistentes con la intoxicación crónica por este metal y su capacidad de actuar como un disruptor endócrino. Si a esta evidencia se la complementa con el hecho de que los ciudadanos más poderosos eran quienes tenían más acceso a vinos endulzados y agua canalizada, este planteamiento ganaría considerable solidez. Sin embargo, cabe mencionar que hoy en día esta hipótesis se vio matizada por una variedad de factores. Uno de ellos es que las cañerías traían agua que provenía de cadenas montañosas y que contenía carbonato de calcio, un mineral que habría generado una suerte de lámina en el interior de las tuberías e impedido la liberación del plomo al suministro de agua (Riva *et al.*, 2012). Asimismo, varios historiadores, militares y economistas han propuesto una variedad de elementos que contribuyen, en mayor medida, a explicar el declive de Roma. Aun así, estos argumentos no niegan la presencia de un alto contenido de plomo en los huesos, ni de la epidemia de gota, ni de otras enfermedades relacionadas con la contaminación por plomo que eran frecuentes en ese período histórico (Lessler, 1988).

Pese al conocimiento de esta enfermedad desde la Antigüedad, a partir de la Edad Media comienza una elipsis en la literatura clínica referida a la contaminación por plomo (Felton, 1997; Seaton, 2014). Esto no significa que la afección hubiese perdido prevalencia. En Europa en

particular, el uso de plomo en objetos cotidianos llevó a niveles generalizados de plumbemia en la población. Medicinas, cerámicas pintadas, monedas, vitrales y tejas se encuentran entre las principales fuentes de contaminación por este metal. Las primeras tres son de particular relevancia dado que facilitan la ingesta del material, que lleva a grados de contaminación mayores de los que se esperaría por la contaminación a partir del plomo ambiental. Es importante hacer la distinción entre las comunidades urbanas y las rurales, puesto que las primeras fueron las más afectadas dada la ubicuidad del metal, aunque también existen rastros de plomo en la materia ósea de cementerios de los asentamientos rurales más remotos de la época (Rasmussen *et al.*, 2015).

Comenzado el Renacimiento, los niveles de plomo ambientales no hicieron más que aumentar con la llegada de nuevas formas de utilización del metal (su uso era especialmente relevante en cosméticos y jarabes endulzantes) y el incremento del comercio y el transporte. La extensión mundial del plomo fue de la mano con la elaboración de sus compuestos derivados de los obtenidos directamente de los yacimientos. Por ejemplo, a pesar de existir yacimientos de galena en América y de su uso como pigmento (Doménech-Carbó *et al.*, 2020), los estudios sobre la alfarería realizada por las civilizaciones andinas durante el período de la colonización europea muestran el uso extendido del carbonato de plomo, proveniente de Europa, como pintura blanca (Curley *et al.*, 2020). En particular, llama la atención el comienzo de su diseminación en cultivos, a modo de pesticida, durante el siglo XV (Lanzirotti *et al.*, 2014). Esta tendencia de intoxicación generalizada se mantendría hasta el siglo XVIII, primero en Europa y luego extendiéndose a América (Felton, 1997).

Fue también en esta época que se renovó el interés médico del plomo como contaminante. Existen varias hipótesis sobre por qué fue este el momento en que se despertó cierta conciencia sobre los peligros asociados a este metal. Una de ellas es el aumento de la visibilidad y el aprecio por el arte, así como los grandes desplazamientos de artistas y artesanos a las zonas urbanas para trabajar en las mansiones y catedrales emergentes. Dada la prevalencia del plomo en pinturas, estos trabajadores eran de los grupos más afectados por la enfermedad, lo que aumentó así la sospecha sobre la posible relación del metal con los síntomas observados. Otra explicación radica en el fuerte interés por la alquimia que tuvo lugar en los siglos XV y XVI y la atención que esta trajo al estudio de los metales (Zilberstein *et al.*, 2019). La alquimia en particular dejó su marca dándole origen a la denominación *saturnismo* para referirse a la contaminación por plomo.

Gracias a este renovado interés, se comenzó a entender los riesgos ocupacionales del plomo y se logró llegar, paulatinamente, al entendimiento de los peligros a los que se exponían los trabajadores en minas, cristalerías, alfarerías y más. En un artículo de 1677, en la revista *Philosophical Transactions*, de la Royal Society of London, sir Philibert Vernatti describe los síntomas de los trabajadores involucrados en la producción de blanco de plomo:

Los accidentes a los trabajadores son dolores inmediatos en el estómago, con excesivas contorciones en las tripas y constipación [...]; les lleva[n] también a fiebres agudas y gran asma o dificultad para respirar [...]; luego, vértigo o mareo en la cabeza, con gran dolor continuo en las cejas, ceguera, estupidez, y parálisis, pérdida del apetito, náuseas y vómitos frecuentes, generalmente de flema sincera, a veces mezclada con cólera, hasta el más extremo debilitamiento del cuerpo (Vernatti, 1677).

Curiosamente, pese a que en el ámbito laboral el entendimiento del saturnismo iba aumentando, esta tendencia no se trasladó a los aspectos no relacionados con el trabajo hasta mucho más tarde. A modo de ejemplo, iniciado el siglo XVIII, el reconocido médico italiano Bernardino Ramazzini declaró todas las labores en las que se utilizaba el plomo como nocivas para la salud, exigiendo protección para el trabajador (Riva *et al.*, 2012). Sin embargo, recién por esta época se relacionó el cólico de Devonshire, enfermedad que azotaba fuertemente al condado homónimo, con el uso de instrumentos de plomo para la fabricación de sidra (Hernberg, 2000; Riva *et al.*, 2012).

1.3. El plomo en el arte: la paleta mortal de los grandes maestros

Las propiedades de los compuestos de plomo para su uso en el arte no solo derivan de sus colores (tabla 1), sino también de su capacidad de rápido secado (Coccatto, Moens y Vandenabeele, 2017).

Tabla 1. Selección de compuestos relevantes de plomo

| Nombre químico | Fórmula química | Mineral | Nombre común | Color |
|--|--|-----------------------|----------------------------|---------------------|
| Óxido de plomo (II) | $\alpha\text{-PbO}$ | Litargirio | Monóxido de plomo | Naranja amarillo |
| Óxido de plomo (II) | $\beta\text{-PbO}$ | Masicote | Monóxido de plomo | Amarillo |
| Óxido de plomo (II, IV) | Pb_2O_3 | | Sesquióxido de plomo | Anaranjado amarillo |
| Óxido de plomo (II, IV) | Pb_3O_4 | Minio | Rojo de plomo | Anaranjado rojizo |
| Óxido de plomo (IV) | PbO_2 | Plattnerita | Dióxido de plomo | Marrón oscuro |
| Carbonato de plomo (II) | PbCO_3 | Cerusita | Carbonato neutro de plomo | Blanco |
| Clorocarbonato de plomo (II) | $\text{Pb}_2\text{Cl}_2\text{CO}_3$ | Fosgenita | Clorocarbonato de plomo | Amarillo |
| Carbonato hidróxido de plomo (II) | $\text{Pb}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ | Hydrocerusita | Carbonato básico de plomo | Blanco |
| Cloruro de plomo (II) | PbCl_2 | Cotunnita | | Blanco |
| Hidrocloreuro de plomo (II) | PbClOH | Laurionita | Cloruro básico de plomo | Blanco |
| Sulfato de plomo (II) | PbSO_4 | Anglesita | Sulfato de plomo | Blanco |
| Sulfuro de plomo (II) | PbS | Galena | Negro de plomo | Negro |
| Óxido de antimonio y plomo (II) | $\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$ | Bindheimita | Amarillo de Nápoles | Amarillo anaranjado |
| Cromato de plomo (II) | PbCrO_4 | Crocoita | Amarillo cromo | Amarillo |
| Óxido de estaño y plomo (II) | Pb_2SnO_4 | Masicote ^a | Amarillo de estaño y plomo | Amarillo verdoso |
| Óxido de titanio y plomo (II) | PbTiO_3 | Macedonita | Titanato de plomo | Amarillo marrón |
| Sulfato hidróxido de plomo (II) y hierro (III) | $\text{Pb}_{0.5}\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ | Plumbojarosita | | Dorado marrón |

^aLa denominación *masicote*, destinada originalmente para el PbO , fue extendida al Pb_2SnO_4 .

La diversidad de compuestos de plomo usados desde la Antigüedad (Pizzini, 2012) y la variedad de colores asociados a ellos dan cuenta de su ubicuidad en el arte (Sanz y Gallego, 2001). El estudio de los

pigmentos aplicados en el arte desde el punto de vista químico resulta fundamental para su preservación, así como para una mejor comprensión de las paletas empleadas por los diferentes artistas (Council, 2005). La National Gallery of Art de Washington (Estados Unidos) ha recopilado información química de los pigmentos más conocidos en un libro de consulta obligada para aquellos que desean acercarse a este tema (Feller, 1986).

Los efectos de la contaminación con plomo de los pintores renacentistas fueron conocidos en su época como *cólico del pintor* o *locura del pintor*. Michelangelo (1475-1564) y Caravaggio (1571-1610) fueron los personajes más reconocidos por padecer esta condición, y en el caso de este último, se han encontrado altos niveles de plomo en sus restos óseos (Vinceti y Gruppioni, 2010). Otros grandes artistas también son considerados víctimas de la intoxicación con plomo: Rubens (1577-1640), gota; Fortuny (1831-1874), hemorragia estomacal, y Van Gogh (1853-1890), locura, aparente suicidio (Montes-Santiago, 2013).

El uso extendido del plomo en las obras de arte puede constituir una fuente de contaminación ambiental. Por ejemplo, debido al incendio que tuvo lugar en la catedral de Notre Dame, de París, en 2019, se produjo una liberación al ambiente del plomo contenido en sus estructuras y piezas artísticas, que fue calificada como un evento mayor de contaminación local. Los efectos de esta contaminación fueron detectados en la miel cosechada luego del incendio, con niveles de plomo hasta tres veces más altos que la miel cosechada en áreas no afectadas (Smith *et al.*, 2020).

1.3.1. BLANCOS

Desde un punto de vista químico, el blanco de plomo no es más que carbonato básico de plomo (Wiberg *et al.*, 2001). Pese a su simpleza, este es probablemente uno de los pigmentos más importantes en la historia, dado su continuo uso desde la Antigüedad hasta el siglo XIX, con mínimas alteraciones en su formulación. La receta más antigua para su fabricación fue encontrada en Grecia, data del año 315 a. de C. y es debida a Teofrasto de Ereso. El blanco de plomo fue indispensable en la producción de cosméticos para aclarar la apariencia de la piel, lo que lo convirtió en una fuente de contaminación sumamente importante desde la Antigüedad (Welcomme *et al.*, 2006). El proceso de manufacturación más conocido fue popularizado en Holanda (método holandés) y consiste en la degradación del plomo con calor y vapores ácidos. La mayoría de los procesos utilizados más tarde son variaciones de esta receta (Sanz y Gallego, 2001) e incluyen la mezcla con blanco de bario (BaSO_4) para dar lugar a los blanco de Hamburgo, blanco de Holanda

y blanco de Venecia. El resultado de estas mezclas son pigmentos de un brillo y color excepcionales, de rápido secado, solubles en ácidos débiles y utilizables en pinturas al óleo, pinturas de exterior y maquillaje. Desde Rembrandt a Vermeer, este era el blanco de elección de los principales artistas, quienes lo consideraban indispensable para representar apropiadamente los juegos de luces y blancos de sus obras (Janson, 2020). Durante la era victoriana, los museos y bibliotecas usaban lámparas de gas que emitían sulfuro de hidrógeno al ambiente, que, en contacto con el blanco de plomo, producía galena de color negro. Muchas obras de arte expuestas en los museos hoy en día muestran su deterioro debido a este efecto.

El uso extensivo del blanco de plomo en las pinturas de las casas llegó hasta mediados del siglo XX (y hasta la actualidad en aquellos países que carecen de leyes de control) y constituyó la principal fuente de plomo en los hogares (Sowers *et al.*, 2021) y un factor decisivo de la contaminación con plomo en los infantes.

1.3.2. ROJOS

El rojo de plomo, también conocido como *minio* (Ayalew, Janssens y De Wael, 2016), fue utilizado desde los tiempos del Imperio romano hasta el siglo XX. Es una combinación de protóxido y peróxido de plomo, y experimenta un deterioro frente a la luz, lo que da lugar a la aparición de tonos más oscuros producto de la sulfatación y transformación de estos óxidos en otras formas cristalinas, como la plattnerita ($\beta\text{-PbO}_2$) y la anglesita (PbSO_4), que ocurre con el paso del tiempo (Aze *et al.*, 2007). El color rojo intenso se usa hasta el día de hoy, por ejemplo, en las máscaras con que son maquillados los actores del teatro chino (Wang *et al.*, 2020), una profesión no siempre incluida en las leyes de seguridad laboral.

1.3.3. AMARILLOS Y ANARANJADOS

Antes del siglo XIII, el masicote (PbO) fue la principal fuente de color amarillo en las pinturas. Posteriormente, fue sustituido por el amarillo de plomo-estaño tipo II ($\text{PbSn}_{1-x}\text{Si}_x\text{O}_3$), cuyo uso se extendió hasta mediados del siglo XVII y se superpuso con el del amarillo de plomo-estaño tipo I, que fue también denominado *masicote* por su semejanza con el PbO (Clark *et al.*, 1995).

A comienzos del siglo XVIII, el amarillo de plomo-estaño fue completamente sustituido por el amarillo Nápoles ($\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$), que dominó a lo largo de los siglos XVIII y XIX, que presentaba mejores características pictóricas en cuanto a intensidad y facilidad de secado. Este pigmen-

to fue progresivamente sustituido por el cromato de plomo (PbCrO_4) a principios del siglo XIX (Otero *et al.*, 2012) y usado ampliamente por los impresionistas. Finalmente, a partir de mediados del siglo XIX, dos pigmentos sin plomo prevalecieron como fuentes de los amarillos: el amarillo de cadmio y el amarillo cobalto, debido al oscurecimiento observado por efecto de la incidencia de la luz sobre las pinturas con cromato de plomo (Monico *et al.*, 2011).

En 1930, se patentó un nuevo pigmento conocido como *molibdato naranja* (también como *molibdato rojo*), que es una mezcla de PbCrO_4 , PbSO_4 y PbMoO_4 en proporciones variables para dar diferentes tonalidades, utilizado para la pintura de plásticos.

Entre los autores relevantes que hicieron uso de este compuesto están Rafael, Rembrandt, Velázquez y Vermeer (figura 5).

1.3.4. VERDES

La mezcla de amarillo con azul da lugar al color verde, por lo que el amarillo cromo mezclado con el azul de Prusia fue extensivamente usado como fuente de color verde por muchos años, logrando diferentes tonalidades mediante un cambio en la proporción relativa de esos pigmentos (Smith, 1983). En particular, Cézanne y Vermeer fueron maestros en el uso de este color. El uso de esta mezcla de colores se hizo extensivo a la pintura de las casas, bajo el nombre de *verde Brunswick*, y en la actualidad constituye una importante fuente de contaminación en los hogares (Ansin *et al.*, 2019).

Figura 5. Los amarillos alcanzados por los pintores estuvieron basados en diferentes compuestos de plomo: a) Rembrandt usó amarillo de plomo-estaño tipo II para las vestimentas en la pintura *La novia judía* (1665); b) Vermeer usó amarillo Nápoles en su obra *La lechera* (1660) para el traje de su protagonista; c) Van Gogh usó cromato de plomo para sus *Girasoles* (1888). Las figuras 5a y 5b fueron obtenidas de Archive.org; la figura 5c corresponde a una fotografía obtenida de la pintura original por uno de los autores (Méndez)

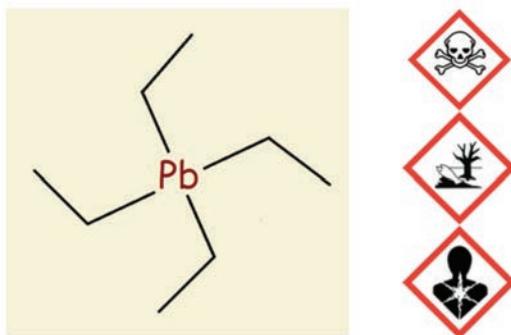


1.4. El plomo en la era del consumo: propaganda y ocultamiento

El siglo XIX trajo consigo nuevas formas de usar el plomo. Una de las primeras fue la batería de plomo ácida de Gastón Planté, cuyo diseño inicial experimentó varios cambios hasta que en 1880 su utilización se disparó en los vehículos automotores (Kurzweil, 2010). Este hito no debe ser subestimado, ya que el gigantesco crecimiento de la industria automotriz ha tenido un gran impacto como fuente de contaminación con plomo. Durante este proceso, los trabajadores han mostrado, sistemáticamente, niveles de plomo en sangre muy superiores a los especificados en las guías de seguridad, y son los que trabajan en el reciclado de baterías para obtención de plomo los más afectados. Dado que este proceso de reciclaje comporta el 50 % de la producción de plomo y tiene un impacto ambiental muy superior a la producción de las baterías en sí, es posible poner en cuestión la viabilidad de las baterías de plomo a largo plazo. Pese a que estas baterías tienen una variedad de aplicaciones, la industria automotriz continúa siendo el principal origen de su demanda (Mao, Dong y Graedel, 2008).

Años más tarde, también dentro de la industria automotriz, surgió otro descubrimiento que incrementaría la concentración de plomo atmosférico por décadas. En 1921, los ingenieros de General Motors determinaron que el agregado de tetraetilplomo (TEL) a la gasolina reducía considerablemente el golpeteo del motor (Seyferth, 2003). Este compuesto, lejos de ser nuevo, había sido identificado en 1854, pero no se le había dado un uso industrial debido a la ya conocida toxicidad del plomo (figura 6).

Figura 6. Estructura química del TEL y los pictogramas de seguridad asociados a esta sustancia: tóxico, daño al ambiente y daño a la salud.



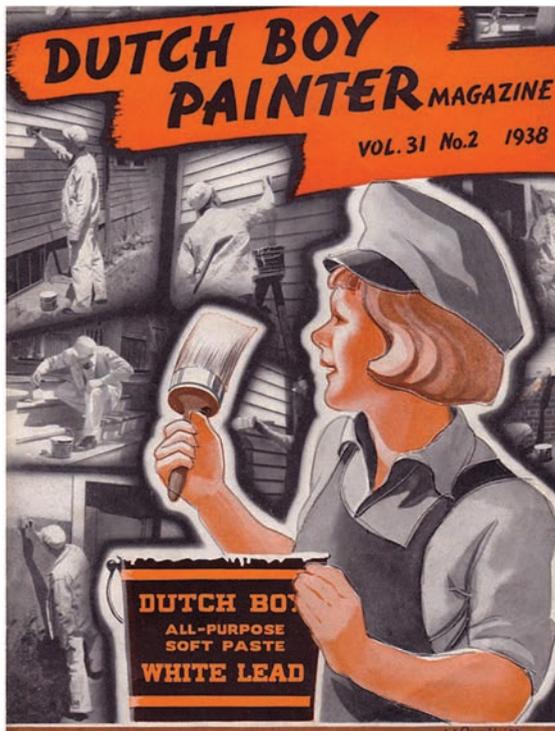
No obstante, la búsqueda de aditivos para el combustible que resolvieran el golpeteo era feroz. Hasta ese momento, el alcohol etílico parecía ser el futuro de los aditivos para la gasolina; sin embargo, varios problemas de índole técnica, así como fuertes presiones de la industria petrolera y la batalla legal y política de General Motors por utilizar un aditivo patentable, lograron que el TEL se transformara en el estándar de la industria. Para 1923, los cambios de infraestructura necesarios para el uso del TEL habían culminado y la nueva formulación del combustible entraba en el mercado. En 1947, un artículo de la revista *Nature* daba cuenta de la intoxicación de uno de los científicos encargados de la síntesis del TEL (McCombie y Saunders, 1947). Sin embargo, las legislaciones para su control o eliminación no surgieron inmediatamente. Si bien la Unión Soviética prohibió radicalmente el uso del TEL en combustibles en 1967, la mayoría de los países tuvieron respuestas más tardías y menos efectivas. Recién en los años setenta algunos países como Japón o Estados Unidos promulgaron leyes para la reducción del uso de aditivos con plomo en los combustibles.

Hasta finales del siglo XIX, la toxicidad por plomo se encontraba principalmente asociada al trabajo. Sin embargo, la introducción de pinturas a base de plomo para uso residencial provocó la aparición de síntomas de toxicidad por plomo en los niños. Concretamente, el blanco de plomo se había convertido en el estándar de blancos no solo en pinturas de arte, sino también en grandes superficies. Este rubro se volvió particularmente notorio dado que en el siglo XX la industria de pinturas continuó utilizando el carbonato de plomo en sus pinturas blancas, pese a conocer los peligros asociados a ese pigmento. Organizaciones como la Asociación de Industrias del Plomo diseñaron campañas para impedir la aprobación de leyes que limitaran el uso de pinturas basadas en compuestos de plomo, así como para negar la información científica que denunciaba los peligros del uso de estos compuestos (Markowitz y Rosner, 2000).

Una parte de estas campañas consistía en desestimar el riesgo en los niños, utilizando imágenes de jóvenes en sus publicidades e instándolos a participar del pintado de sus casas y a manipular objetos de plomo (Markowitz y Rosner, 2000). Uno de los casos más notorios es el libro de rimas infantiles, publicado por la Compañía Nacional del Plomo (National Lead Company) de Estados Unidos, *La fiesta del niño holandés: un libro de pintura para niñas y niños* (1923b) (figura 7), el cual estaba explícitamente destinado a niñas y niños pequeños (National Lead Company, 1923a). No fue hasta 1950 que la industria fue obligada a adoptar una postura de limitación del plomo en las pinturas de interiores. Sin embargo, la prohibición total en Estados Unidos tuvo

lugar recién en 1978, a pesar de que en otros países el control había comenzado mucho antes: en 1897 en Australia, y en 1909 en Francia, Bélgica y Austria.

Figura 7. Fascículo de la revista *Dutch Boy Painter* ('El niño pintor holandés') de 1938, que ilustraba a la población acerca del uso de pinturas (usualmente, a base de plomo) para el hogar. La imagen del niño holandés quedó firmemente asociada a las pinturas blancas a base de plomo (*white lead*), y la propaganda comercial incluyó libros de pintura para niños. La contaminación por plomo debido al uso extendido de estas pinturas en los hogares de todo el mundo constituyó, junto con las emisiones de combustibles con TEL, uno de los factores fundamentales para la diseminación global del plomo. Imagen obtenida de Internet Archive (Archive.org), con el identificador DutchBoyPainter19380304, agregado el 15 de diciembre de 2018 (Retrieved from the Digital Public Library of America, 1913)



1.5. La lucha contra la desinformación: los fantasmas del doctor Stockmann

Cuando el doctor Stockmann debió enfrentar el tema de la contaminación en su balneario, nunca pensó que iba a ser considerado *enemigo del pueblo* por aquellos a quienes quería proteger. Poseedor de la solución al problema, el doctor Stockmann pronto vio cómo los actores involucrados iban mucho más allá de los contaminadores-contaminados directamente. Como inesperados fantasmas, personajes con diferentes motivaciones rodeaban al doctor Stockmann, con intereses que surgían desde el amor (su esposa) hasta el poder político (su hermano), o que buscaban desinformar a la población por medio de la prensa (su futuro yerno).

El mensaje de la obra *Un enemigo del pueblo* (1882), de Henrik Ibsen (1828-1906), mantiene una vigencia excepcional. De una manera muy singular, la obra no se centra en el individuo que busca la solución de un problema para su pueblo, sino que sugiere cómo el mismo pueblo, su falta de información, oportunos obstáculos burocráticos, malas (y buenas) intenciones y una prensa de dudosa independencia pueden jugar en conjunto para convertirse, colectivamente, en los verdaderos enemigos de sí mismos. De esta manera, Ibsen reflexiona sobre la validez de la razón de las mayorías, por la sola validación numérica que la democracia otorga, y cómo la desinformación y algunos intereses pueden llevar a que «la mayoría no siempre tenga la razón».

Figura 8. En la obra *Un enemigo del pueblo*, el dramaturgo Ibsen reflexiona sobre la validez de la razón de las mayorías cuando estas no están correctamente informadas. La frase *las mayorías no siempre tienen la razón*, tantas veces mal utilizada o referida como una frase totalitaria, tiene un significado muy profundo que conviene tener en cuenta. Imagen obtenida de: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Henrik_Ibsen_by_Olaf_Gulbrandsen.jpg>



Esta frase tan provocadora resurge cada tanto frente a eventos que apuntan hacia el abuso del poder y la complicidad de los medios en la desinformación. En la década del cincuenta en Estados Unidos, en plena cacería de brujas del senador Joseph McCarthy, el escritor Arthur Miller rescató la obra de Ibsen modernizando ligeramente la figura del doctor Stockmann. La maestría de Miller al traer la obra nuevamente a la cartelera para describir una situación que no se emparentaba con la contaminación ambiental fue confirmar la universalidad de su mensaje, apuntando directamente contra el abuso de poder y la desacreditación de los que buscan la verdad. Con la llegada de Donald Trump al poder en Estados Unidos, la obra de Ibsen tuvo un particular resurgimiento, y en 2018 se llevó a cabo una adaptación en la ciudad de Flint bajo el

título *Public Enemy: Flint* (Davey, 2017), en clara alusión a la situación de contaminación con plomo en esa ciudad (véase la sección 1.5.2).²

El tema de la plumbemia no está alejado de este dilema planteado por Ibsen, no solo en Uruguay, sino también en el mundo: un contaminante, de efectos tan graves en la población (sobre todo infantil), cuyo uso fue promovido como inocuo hasta mediados del siglo XX, que de golpe se convirtió en el malo de la película. Frente a esto, los afectados en su salud, los afectados económicamente, la prensa que busca la alarma, la prensa que —a veces, sin malas intenciones— desinforma, la academia, que trabaja sin coordinación, la burocracia, que limita la aplicación de soluciones y promueve la desinformación a nivel educativo, forman un paquete que termina limitando las soluciones a este problema. Y esa desinformación de las mayorías es sustentada desde las propias mayorías, en un mecanismo perverso. Los ejemplos tratados a continuación, relacionados con la contaminación con plomo confirman la vigencia del mensaje de Ibsen.

1.5.1. ELIMINACIÓN DEL PLOMO EN LAS PINTURAS: SETENTA AÑOS DE MENTIRAS Y ENGAÑOS

Hasta la década del cincuenta, la industria de la pintura se encargó de ocultar el problema a la población y de desacreditar a los científicos que intentaban informar acerca de la toxicidad del plomo. En Inglaterra y en Francia, esas alarmas fueron tenidas en cuenta al comienzo del siglo XX y se impusieron nuevas regulaciones. En Estados Unidos, sin embargo, no solo no se siguieron esas alarmas, sino que, además, fueron desacreditadas y la industria de la pintura tuvo un crecimiento importantísimo. La larga batalla contra la desacreditación y la desinformación llevada a cabo por los grupos de poder quedó patente a raíz de las investigaciones realizadas por los investigadores Clair Cameron Patterson y Herbert Needleman (Denworth, 2008). Patterson, geoquímico que investigaba la edad de la Tierra, y Needleman, pediatra, llevaron adelante una verdadera batalla de treinta años para demostrar científicamente los efectos ambientales y sanitarios de la contaminación por plomo. Demostraron la capacidad de dispersión del plomo en el ambiente, y lo encontraron, incluso, en la Antártida (lugar sin actividad antropogénica en aquellos años). Por otro lado, pudieron relacionar inequívocamente el uso de productos comerciales cotidianos que contenían plomo con

2 En Uruguay, la obra mencionada de Ibsen fue estrenada en tres oportunidades: en 1961, en el Teatro El Galpón; en 2001, en el Teatro del Notariado, y en 2019, en el Teatro Solís, por el elenco de la Comedia Nacional. En esta última oportunidad, la adaptación hacía referencia a la instalación de la industria de elaboración del papel a partir de la madera.

la condición sanitaria de los niños expuestos. La industria del plomo ofreció una férrea resistencia a estos cuestionamientos y, a través de su vocero Robert Kehoe, cuestionó los hallazgos e incluso la trayectoria académica de Patterson (Rosner y Markowitz, 2005). Needleman recuerda estas batallas judiciales, en las que se puede ver cómo los intereses de la industria intentaron retorcer y falsear los datos científicos (Needleman, 1998).

Los efectos de la contaminación por plomo en los niños ya era una realidad cuando el Bureau of Community Environmental Management (actualmente, la Environmental Health Services Division del Center for Disease Control —CDC— de los Estados Unidos) tomó cartas en el asunto. Para ello, se embarcó en un plan nacional de detección de plomo, en el marco del acta aprobado por el Parlamento de Estados Unidos en 1971 (Parlamento de Estados Unidos, 1971), que promovía el desarrollo de planes locales que incluían:

1. programas educacionales para comunicar el daño a la salud provocado por las pinturas a base de plomo, incluyendo a padres, educadores y autoridades locales de la salud;
2. desarrollar planes intensivos de análisis en la comunidad, de manera de detectar incidentes de envenenamiento por contacto con pinturas y garantizar el rápido tratamiento de los afectados;
3. asegurar el seguimiento de las personas contaminadas;
4. tomar todas aquellas acciones que redujeran o eliminaran la contaminación por plomo en pinturas.

El primer problema a resolver fue la ausencia de métodos analíticos adecuados para programas masivos de análisis, que implican un número de muestras muy grande. La técnica de uso habitual para la determinación de plomo era la espectrometría de absorción atómica, muy aparatosa y costosa (véase la sección 4.2.1). En vista de este escollo, el CDC hizo un llamado público para el desarrollo de técnicas de análisis masivo para la detección de plomo en sangre, convocatoria que dio lugar a la propuesta de varias metodologías a lo largo de la década del setenta (Anderson y Clark, 1974; Blumberg *et al.*, 1977; Caffo y Lubin, 1976; Cooke *et al.*, 1974; Davidow, Slavin y Piomelli, 1976; Marcus *et al.*, 1975; McCusker, 1977; Mehkeri, Romanowski y Smalkbone, 1976; Mitchell, Aldous y Ryan, 1974; Murphy y Lepow, 1971; Penton y Bissell, 1978; Van Peteghem, Heyndrickx y Vereecke, 1979). Una de las propuestas presentadas, basada en una técnica electroquímica, derivó

en el diseño de un equipo portátil que permitió la realización masiva de análisis de plomo en sangre: el Lead Care®.³

Sobre los aspectos formales del acta referida anteriormente, vale la pena destacar su amplitud con relación a la formulación de soluciones, que no solo incluyen el análisis masivo como forma de relevamiento del estado de situación del problema, sino que también dan un lugar importante a la difusión y educación de la población. Estas soluciones vienen a partir del reconocimiento científico del plomo como un potente tóxico, luego de setenta años, tiempo en el que la industria de las pinturas y la prensa se encargaron de mantener a la población desinformada al respecto. La larga batalla de Patterson y Needleman dieron cuenta de esto; el doctor Stockmann también.

1.5.2. LA CRISIS DE FLINT: POBREZA, RACISMO Y CONTAMINACIÓN

En el año 2014, se verificaron altos niveles de plomo en el agua potable municipal de la ciudad de Flint (Michigan, Estados Unidos), que había cambiado su fuente del lago Huron al río Flint (Torrice, 2016). El problema es que el agua proveniente del río Flint carecía del tratamiento anticorrosivo que previene el desprendimiento y la solubilización de partículas de plomo de las viejas cañerías. Durante un año y medio, la población estuvo expuesta a altos niveles de plomo en el agua para consumo, a pesar de que las autoridades locales habían sido prevenidas al respecto y que incluso habían autorizado a una multinacional, la General Motors (otra vez), a cambiar su suministro de agua por haber notado problemas de corrosión en sus líneas.

La llamada *crisis de Flint* demostró cómo el poder puede ser responsable de lo que en la actualidad se conoce como *injusticia ambiental* (Campbell *et al.*, 2016). La población de Flint está integrada principalmente por grupos étnicos no blancos (afrodescendientes y latinos), de los cuales un 42 % vive por debajo del límite de la pobreza. La zona tuvo una importante actividad industrial desde 1930, principalmente en el área automotriz: producía baterías de plomo, pinturas y gasolina, lo que llevó a una importante contaminación de la zona, en particular del río Flint. Por ese motivo, la fuente de agua para su potabilización se ubicó en el lago Huron. El cambio de esta fuente de agua al río Flint fue seguido de los protocolos aprobados para determinar su calidad y su capacidad anticorrosiva para evitar la liberación de plomo de las cañerías. Sin embargo, una sucesión de fallas en los controles llevó a

3 Este equipo, usado extensivamente en todo el mundo desde la década del ochenta, ya tiene varias actualizaciones, y su adquisición en Uruguay formó parte de las acciones tomadas por el Ministerio de Salud para enfrentar el problema de la plombe-mia en la población infantil (comunicación personal de la doctora Carmen Ciganda).

la obtención de resultados que indicaban que el agua para consumo de Flint no tenía plomo. Estas fallas incluyeron errores inadmisibles en la toma de muestra y la confección de informes que ocultaron estos errores a las autoridades sanitarias de la Environmental Protection Agency (EPA), que llevó a no tomar medidas sanitarias y a que los eventos de contaminación de la población continuaran (Jacobson *et al.*, 2020).

Estas fallas han sido relacionadas con una falta de interés en la suerte de la población afectada, mayoritariamente afrodescendiente y pobre. El reporte de la comisión que investigó el caso concluyó que:

Los residentes de Flint, que son mayoritariamente negros o afroamericanos, y entre los más empobrecidos de cualquier área metropolitana de los Estados Unidos, no tienen el mismo grado de protección de los peligros ambientales y de salud que el que se les provee a otras comunidades (Board, 2016).

La investigación, que incluyó la correspondencia epistolar entre varios de los jerarcas involucrados, pudo constatar, incluso, la puesta en duda sobre la real toxicidad del plomo (Eligon, 2016), algo que la industria de las pinturas supo bien cómo hacer.

La crisis de Flint tuvo lugar durante la administración de Barak Obama y dejó en claro la necesidad de reforzar las regulaciones ambientales en los Estados Unidos, tarea que quedó en manos de la nueva administración a cargo de Donald Trump. La nueva administración designó a Scott Pruitt, un conocido antagonista de la propia agencia que pasó a liderar (Dennis, 2017). Entre las muchas decisiones controversiales que tomó, intentó postergar, por seis años más, la actualización de los estándares sobre los límites de plomo, que debía producirse en 2017. Una corte federal le ordenó su actualización en noventa días, remarcando la importancia del tema. En 2018, hubo un cambio de postura en la dirección de la EPA y se convocó a los líderes de distintas organizaciones para atacar el problema de la plumbemia infantil. En 2019, Pruitt debió renunciar entre una ola de denuncias y escándalos.

El relato de ambos acontecimientos muestra los caminos por los que el poder político o económico mantienen a la población en un estado de desinformación. En el pasado vimos, con el ejemplo del *Dutch Boy*, cómo la propia industria de la pintura no solo negaba la toxicidad del plomo, sino que, además, producía material para niños que propiciaba el uso de pinturas a base de plomo. Ya ni siquiera se buscaba el ocultamiento: se apostó a la promoción. El peligro presente y futuro es la desacreditación de los científicos, que terminaría por redondear una estrategia peligrosa, lo que dejaría a la población únicamente con la versión de los responsables del daño.

En el caso de la crisis de Flint, el poder se organizó de manera de ocultar la información a los órganos que debían atender la situación de contaminación (la EPA en este caso). Se optó por ahorrar los dineros que hubieran tenido que invertir, a costa de la salud de una población históricamente postergada en sus derechos. Incluso, se ha relacionado el problema de Flint con la supremacía blanca (Inwood, 2018). En los hechos, el acceso a los más altos niveles de decisión en materia ambiental de grupos históricamente opuestos a una regulación en esa área se tradujo en la eliminación o dilatación de las regulaciones. Más allá de las opiniones políticas y las interpretaciones subjetivas, lo fundamental es mantener los hechos de forma transparente y objetiva, y el caso de Flint, una vez más, dejó en evidencia la importancia de tener presente la problemática de la contaminación con plomo.

La obra de Ibsen muestra una actualidad asombrosa y nos hace ver cuán lejos estamos de enfrentar efectivamente al poder cuando este se ejerce de mala manera. El empoderamiento de la gente en la solución de los problemas parece ser un camino razonable, pero requiere de la información y de la educación, ya que la información tergiversada por la alarma es también una forma de desinformación.



El plomo en la salud y en la enfermedad

El plomo es un metal que se acumula en el cuerpo sin dar síntomas visibles en bajas concentraciones, pero tiene la capacidad de acumularse con el tiempo, por lo que la continuidad en la exposición determina la aparición de los síntomas. De alguna manera, actúa como un contaminante silencioso, que muestra sus consecuencias cuando el daño ya es importante. Prácticamente todos los órganos del cuerpo se ven afectados, y los efectos en los niños son devastadores, ya que afecta su normal desarrollo y su calidad de vida en la adultez.

Lo que sabemos hasta ahora, con los años de experiencia acumulada, son principalmente dos cosas: *i)* no podemos eliminar el plomo del ambiente, y *ii)* debemos aprender a convivir con el plomo, es decir, debemos saber cómo prevenirnos de su contaminación. El primer aspecto implica un reconocimiento, pero no una resignación. Reconocer que si eliminamos el plomo de un lugar es porque lo colocamos en otro lugar es la indicación clara de que no nos podemos deshacer de él. Otros contaminantes, principalmente orgánicos, pueden ser eliminados, por ejemplo, por combustión. Sin embargo, el plomo no puede eliminarse. El segundo aspecto indica que debemos conocer todo sobre el plomo: dónde se encuentra, cómo entra a nuestro organismo, qué hacer en caso de una contaminación accidental, cómo evitar que ingrese a nuestro organismo, cómo alejarlo de nuestro hogar. Reconocer su existencia y saber cómo protegernos del plomo va de la mano con una palabra: *educación*. No en vano, mundialmente, se ataca el problema cubriendo dos frentes: legislación que limite el uso del plomo y educación a todo nivel.

En esta sección, repasaremos cómo ingresa el plomo a nuestro cuerpo, lo que implica saber cuáles son las fuentes naturales y antropogénicas del plomo. Bucearemos brevemente en los mecanismos bioquímicos de la intoxicación, lo que nos permitirá reconocer algunos síntomas.

Finalmente, con base en estos aspectos bioquímicos, analizaremos por qué una dieta sana puede ayudarnos a prevenir o mitigar la contaminación con plomo.

A pesar de tratarse de un tema de actual vigencia, y sobre el que la ciencia ha hecho aportes significativos para su comprensión, su historia, como hemos visto, se remonta hasta el neolítico. El plomo no solo ha acompañado a las civilizaciones humanas a lo largo del tiempo, sino que también ha formado parte de sus creencias y de su mítica, que también es parte de su cultura.

2.1. El saturnismo: una historia de dioses y muerte

Más allá de los efectos nocivos del plomo, que fueron descubiertos en los últimos siglos, existe un vínculo sumamente fuerte entre este metal y el mundo de lo mítico. En el 2000 a. de C., los egipcios ya utilizaban el plomo como componente fundamental de sus ataúdes, asociando fuertemente al plomo con Osiris, dios del pasaje de la vida a la muerte. De forma similar, en Norteamérica pueden encontrarse cunetas de galena en los sitios donde se realizaban los rituales funerarios y entierros. En particular, en Roma y Grecia antigua, las urnas que contenían restos cremados eran comúnmente hechas a base de plomo (Warren, 2001).

Durante el Renacimiento europeo, probablemente influenciado por sus asociaciones supernaturales, el plomo pasó a asociarse con Saturno. Más que solo un planeta, Saturno tuvo sus inicios como una deidad romana de la agricultura y la creación. Durante la conquista de Grecia por el Imperio romano, esta deidad fue fusionada con Cronos, el titán griego del tiempo. De esta unión de panteones surgió una nueva entidad, que incorpora características de ambos seres mitológicos y cuya simbología se relaciona directamente con el plomo (Wasson, 2015). Entre estas características, el mito de Saturno-Cronos es fundamental ya que es una de las mayores fuentes de inspiración para las conceptualizaciones místicas más modernas del metal. Este relato fue transcrito de la tradición oral en la *Teogonía*, de Hesíodo, y se resume en los siguientes párrafos (Caldwell, 2003):

La historia comienza con el cielo (Urano) y la Tierra (Gaia), de cuya unión carnal surgieron doce titanes, tres cíclopes y tres cienmanos. Odiándolos desde su concepción, el padre escondió a su descendencia en los lugares más recónditos de la Tierra. Con cada uno, el dolor de Gaia aumentaba, hasta que su paciencia acabó. Rogó a sus hijos que castigaran a su padre, pero solamente el menor de los titanes, Cronos, tuvo la valentía necesaria para

enfrentarse a Urano. Armado con una hoz que le dio su progenitora, esperó hasta que el cielo se acostara con la Tierra para salir de su escondite. En un instante utilizó su herramienta para castrar a su padre y desechó sus genitales en el mar.

Este acto estableció a Cronos como nuevo regente del cosmos, desposando a su hermana Rhea para que gobierne a su lado. Sin embargo, Gaia y Urano revelan una profecía que lo llena de angustia: así como el titán había destronado a su padre, él mismo estará destinado a ser destronado por su propio hijo. Obsesionado por escapar a su destino, el titán comienza a devorar a sus hijos en el momento en que nacen. Así, Hestia, Demeter, Hera, Hades y Poseidón son consumidos sin remordimiento en el instante de su nacimiento. Nuevamente embarazada, el dolor se apodera de Rhea, y, negándose a perder otro hijo, pone en marcha un plan. Con la ayuda de Gaia, da a luz y esconde a su último hijo, Zeus. Para eliminar las sospechas de Cronos, Rhea envuelve una roca en ropa de bebé y se lo presenta a su marido, quien la devora bruscamente sin sospechar del engaño.

Pasan los años y el niño crece a espaldas de su padre. Una vez maduro, Zeus engaña a Cronos para que regurgite a sus hermanos. Acto seguido, libera a sus tíos, los gigantes y los cienmanos, que permanecían encerrados en la Tierra, donde Urano los había escondido. Con ellos, comienza una larga guerra en la que los titanes son derrotados y Zeus pasa a ser el nuevo líder del cosmos, desterrando finalmente a su padre Cronos, tal como establecía la profecía.

Con base en este mito, los alquimistas renacentistas consolidaron finalmente el vínculo entre el plomo, el planeta Saturno y la deidad Saturno-Cronos. La primera asociación es una vinculación de índole física, en la que la relativa opacidad y el peso del plomo se asocian a la palidez y lentitud del titán Saturno-Cronos. Asimismo, la distancia con el Sol causó que al planeta se le asignara un carácter frío, que la alquimia también reconoció en el plomo. Es importante tomar en cuenta que, en el momento en el que se realizó esta asociación, Saturno era el más lejano de los planetas conocidos, puesto que Urano no adquirió su nombre con connotación mitológica hasta 1781, cuando se lo categorizó como planeta (Bourtembourg, 2013). No obstante, la asociación con Saturno no se limita a las cualidades físicas observables del metal en su forma sólida. En efecto, durante los procesos de forja y purificación de metales preciosos, el plomo parece *consumir* los óxidos e impurezas, exponiendo así los metales preciosos puros. Esto generó la idea de que este metal era una suerte de «padre para los demás metales», retomando así la referencia al mito de Saturno-Cronos —padre de los dioses— y

fortaleciendo las asociaciones entre el plomo y Saturno (Smith, 2016). Este vínculo permanece, hasta hoy en día, en uno de los nombres más evocativos para la intoxicación por este metal pesado: el saturnismo.

El nombre *saturnismo* data de finales del siglo XVII, cuando comenzó a formalizarse la concepción de esta enfermedad desde una perspectiva clínica. Sin embargo, no fue hasta la llegada de Tanquerel des Planches, con una de las primeras publicaciones realmente abarcativas de este tema como lo fue su *Traité des maladies de plomb ou Saturnines* (1839), que se popularizó el uso de este nombre en el vocabulario popular (Des Planches, 1839).

2.2. ¿Por qué el plomo nos contamina?

El plomo se encuentra en la naturaleza formando parte de diversos minerales, como la galena, la cerusita y la anglesita (Wiberg *et al.*, 2001). Otros minerales menos abundantes que también contienen plomo incluyen la piromorfita, la vanadinita, la mimelita, la crocoita, la vulferita y la stolzita. En todos estos minerales, el plomo se encuentra formando compuestos muy estables al estado sólido, por lo que tienen poca tendencia a solubilizarse en agua y así liberar a los iones plomo. Esta estabilidad se puede medir a través de la constante del producto de solubilidad (K_{ps}), que se relaciona con la cantidad de iones que deja libre un mineral cuando se lo pone en contacto con el agua (tabla 2). Como se desprende de los datos tabulados, los valores de K_{ps} son extremadamente pequeños, lo que indica que la cantidad de iones plomo que quedan libres en solución es despreciable.

De alguna manera, el plomo se encuentra naturalmente atrapado en esos minerales. Sin embargo, a medida que la especie humana comenzó a transformar estos minerales, con el uso del calor y su exposición al oxígeno, provocó que el plomo se liberara y se dispersara en el ambiente. Asimismo, las transformaciones químicas dieron lugar a compuestos con mayor K_{ps} , por lo que la cantidad de iones plomo libres aumentó. Los humanos, con un sistema bioquímico ya desarrollado y adaptado a un ambiente en el cual el plomo no estaba presente en su forma libre, no desarrolló estrategias bioquímicas para lidiar con él.

Tabla 2. Constantes del producto de solubilidad para algunas sales de plomo a 25°C

| Compuesto | Constante del producto de solubilidad |
|------------------|---------------------------------------|
| $Pb_3(AsO_4)_2$ | 4×10^{-36} |
| PbS | 3×10^{-28} |
| $Pb(OH)_2$ | $1,2 \times 10^{-15}$ |
| PbO | $1,2 \times 10^{-15}$ |
| $PbCO_3$ | $7,4 \times 10^{-14}$ |
| $Pb(OH)Cl$ | 2×10^{-14} |
| $PbCrO_4$ | $2,8 \times 10^{-13}$ |
| PbC_2O_4 | $2,7 \times 10^{-11}$ |
| $Pb(N_3)_2$ | $2,5 \times 10^{-9}$ |
| $PbSO_4$ | $1,6 \times 10^{-8}$ |
| $PbCl_2$ | $1,6 \times 10^{-5}$ |
| $(Pb_2Cl_2CO_3)$ | Ligeramente soluble en agua |

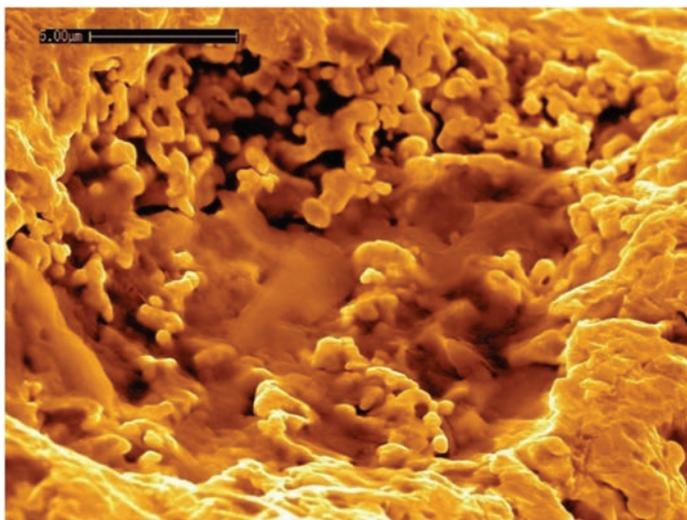
Fuentes: Haynes, 2011; Leygraf et al., 2016

2.3. Una bacteria que puede vivir en presencia del plomo, ¿cómo lo logra?

La cepa CH34 de la bacteria *Ralstonia metallidurans* (figura 9) es capaz de sobrevivir y crecer en presencia de iones plomo, aun en concentraciones milimolares (Monchy *et al.*, 2007), gracias a una proteína que posee una selectividad 1000 veces mayor sobre los iones plomo que sobre otros iones de metales pesados. Esta alta especificidad se debe a la presencia de tres residuos de cisteína en la proteína, que se unen fuertemente al plomo para producir un complejo con una constante de disociación de $8,1 \times 10^{-14}$ (Huang *et al.*, 2016) del mismo orden de las K_{ps} resumidas en la tabla 2.

Esto quiere decir que la bacteria *Ralstonia metallidurans* sí posee un mecanismo bioquímico adecuado para lidiar con el plomo. Para comprender las razones de esto, conviene conocer que esta bacteria fue aislada de los lodos de un tanque de decantación de zinc en Bélgica, que se encontraba contaminado con altas concentraciones de diferentes metales pesados, entre ellos, el plomo (Monchy *et al.*, 2007).

Figura 9. Imagen de una microscopía electrónica de barrido de la bacteria *Ralstonia metallidurans*, único organismo conocido capaz de vivir en presencia del plomo. Tomada de <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35479097>>



2.4. ¿Cómo ingresa el plomo a nuestro cuerpo?

En nuestro organismo existen básicamente tres posibles vías de entrada: la inhalación, la ingestión o el contacto dérmico (Singh *et al.*, 2018). Asimismo, las fuentes de contaminación provienen de distintas fuentes, en su gran mayoría de origen antropomórfico, como son las cañerías antiguas, el polvo de las minas, la actividad industrial, los remedios caseros, las pinturas, la comida contaminada, entre otras.

Respecto a la inhalación, si bien se ha eliminado el plomo de los combustibles en una buena parte de los países, aún continúa presente en pinturas antiguas que al hacerse polvo permiten que este puede entrar por vía aérea en nuestro organismo. Este mismo polvo también puede ingresar por ingestión si se deposita en alimentos o cuando los niños se llevan a la boca juguetes con pintura o material de plomo, o al beber agua que circuló por cañerías antiguas.

Por último, aunque generalmente se asocia solamente a los trabajadores más expuestos, también pueden darse casos de entrada a través de la piel (Kim *et al.*, 2015; Singh *et al.*, 2018; Wani, Ara y Usmani, 2015).

2.5. ¿Por qué es tóxico el plomo?

Los cuadros agudos de intoxicación por plomo derivan en la enfermedad conocida como *saturnismo*. Sin embargo, el efecto nocivo del plomo puede manifestarse de muchas otras formas, especialmente cuando la concentración de plomo en sangre no es tan evidente. La sintomatología asociada puede manifestarse con cuadros clínicos no específicos, como la anemia, lo cual genera que el diagnóstico de intoxicación por plomo se adjudique erróneamente a otras afecciones.

Un ejemplo de esto se encuentra en los estudios sobre la disminución de la cantidad de glóbulos rojos en la sangre de los trabajadores de la industria automovilística (Dongre *et al.*, 2011). La razón de esta disminución se asocia a una inhibición de la biosíntesis del grupo hemo, principal componente de la hemoglobina de los glóbulos rojos, cuyo mecanismo se detalla más adelante (véase la sección 2.5.2).

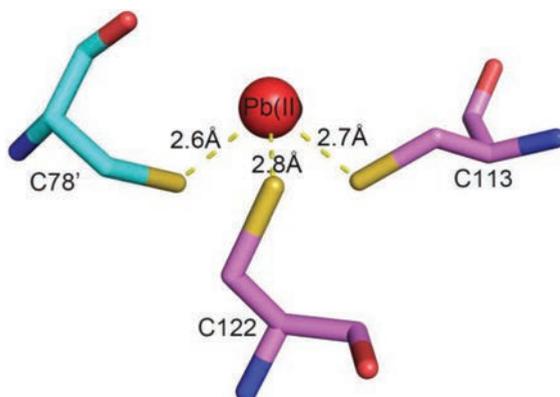
Aparte de causar síntomas hematológicos, el plomo puede afectar el sistema nervioso, generando trastornos en el comportamiento (Kim *et al.*, 2015). Este problema se agrava aún más en niños, cuyo sistema nervioso se encuentra en desarrollo (Al-Saleh, 1998). Además de estos problemas comunes, también se ha encontrado evidencia sobre cuadros toxicológicos diversos como problemas renales, cardiovasculares, reproductivos o incluso oncológicos (Kim *et al.*, 2015; Radosevic *et al.*, 1961).

En su forma iónica, el plomo puede afectar un gran número de procesos debido a que puede interactuar fuertemente con grupos químicos que contienen azufre y suelen formar parte de sitios de unión a metales en proteínas. De hecho, los iones plomo tienen como dianas diferentes biomoléculas que naturalmente interactúan con los cationes divalentes más comunes, como los iones calcio (II), zinc (II), hierro (II), cobre (II) y magnesio (II), lo que afecta las funcionalidades específicas de los canales iónicos, las enzimas y las proteínas (Tapsoba *et al.*, 2010). La formación de interacciones entre el plomo y las distintas moléculas biológicas puede o bien inhibir una determinada reacción o bien generar alteraciones que resulten en la formación de radicales libres y especies altamente oxidantes que producen estrés oxidativo, lo que lleva a un desbalance en la homeostasis del organismo (Singh *et al.*, 2018).

Los iones plomo tienen en su estructura electrónica un par de electrones solitarios que produce una distorsión en la coordinación con los ligandos. Este par de electrones ocupa un lugar en el espacio que dificulta la aproximación de las moléculas de ligando por uno de los lados del ion. Por este motivo, los iones plomo suelen establecer coordinacio-

nes hemidireccionales con los ligandos. Esta configuración espacial es la que se observó en la proteína de la bacteria *Ralstonia metallidurans* (Huang *et al.*, 2016), en la que los tres residuos de cisteína coordinan con el plomo desde uno de los lados (figura 10).

Figura 10. Esquema tridimensional que muestra la interacción entre los átomos de azufre de tres residuos de cisteína (C78, C113 y C122, en amarillo) desde un lado del plano que contiene al ion plomo (II). Adaptado del material suplementario del artículo de Huang *et al.*, 2016



La sustitución de iones que actúan como cofactores enzimáticos por el plomo interfiere en la correcta funcionalidad de la enzima, y se ha hipotetizado que la presencia del par de electrones solitarios y su ubicación estérica son las causantes de esto (Gourlaouen y Parisel, 2007).

En suma, desde el punto de vista bioquímico, se presenta como un agente disruptor de amplio espectro, lo cual explica por qué puede generar afecciones tan diversas.

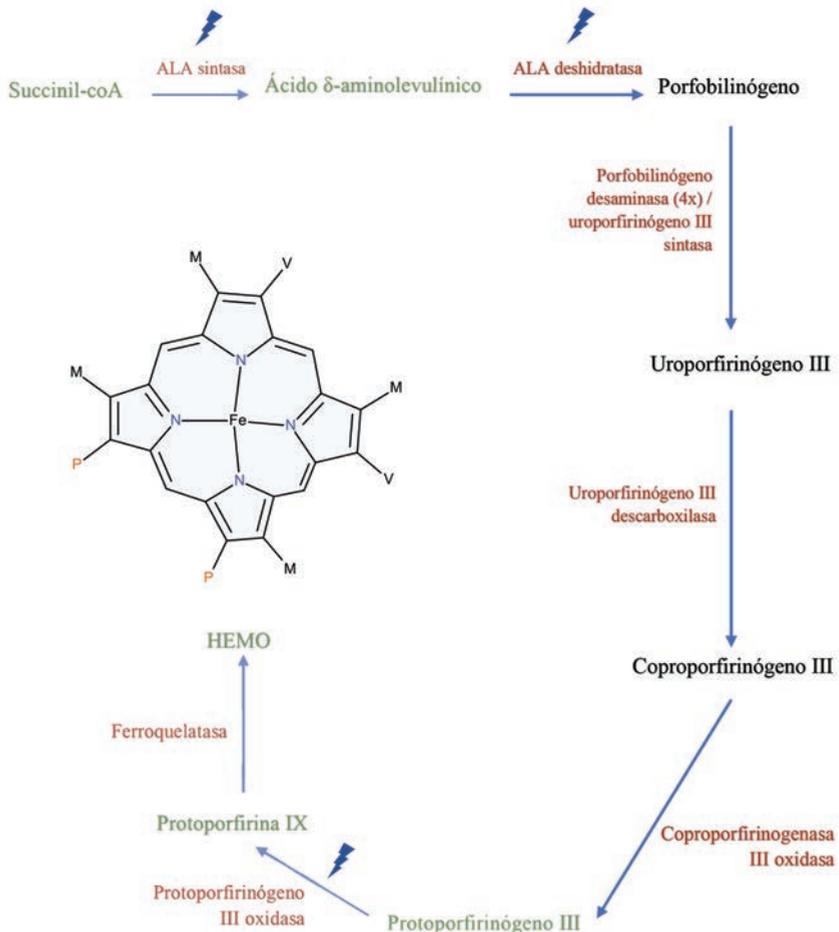
2.5.1. INHIBICIÓN DE LA BIOSÍNTESIS DEL GRUPO HEMO

La biosíntesis del grupo hemo (figura 11) comienza con la síntesis del ácido δ -aminolevulínico (ALA) en la mitocondria, catalizada por la enzima ALA sintasa. El ALA formado sale de la mitocondria y, mediante la acción de la enzima porfobilinógeno (PBG) sintasa, se convierte en PBG. La acción consecutiva de las enzimas PBG desaminasa y uroporfirinógeno III sintasa produce la desaminación del PBG y la posterior condensación de cuatro unidades del producto desaminado, para formar el uroporfirinógeno III. Esta molécula contiene el esqueleto básico de un anillo de porfirina. Las siguientes etapas consisten en la modificación de los sustituyentes de los anillos pirrólicos para producir el protoporfirinógeno IX, que es transportado nuevamente hacia la mitocondria, donde, luego de una posterior oxidación, se produce protoporfirina IX.

Finalmente, la enzima ferroquelatasa cataliza la inserción de iones hierro (II) para producir el grupo hemo.

Los iones plomo inhiben tres enzimas clave en la síntesis del grupo hemo: la ALA sintasa (Jaffe *et al.*, 2001), la PBG sintasa y la ferroquelatasa (Rossi, Taketani y García-Webb, 1993). Las consecuencias clínicas son la acumulación del ALA y la disminución del grupo hemo, con la consecuente aparición de anemia. Entre los indicadores de laboratorio clínico, la cuantificación de plomo en sangre, la detección de protoporfirina libre y la actividad de la 5-ALA deshidratasa son los análisis de elección para el diagnóstico precoz de la contaminación (Kuneva *et al.*, 2015).

Figura 11. Ruta biosintética del grupo hemo. En verde, los metabolitos de la ruta dentro de la mitocondria; en negro, los metabolitos fuera de la mitocondria; en rojo, las enzimas involucradas en cada etapa. El símbolo ⚡ indica las etapas de la ruta que son inhibidas por los iones plomo (II)



2.6. Prevención y mitigación con la dieta

La mitigación de la contaminación por plomo en niños constituiría una política de fácil aplicación masiva si se la compara con emprendimientos mundiales más impactantes, como la eliminación del plomo en los combustibles y en las pinturas (Kordas, 2017). Una forma de «ganarle» al plomo desde la dieta es aumentar la cantidad de aquellos elementos que son sustituidos o eliminados por el plomo en su interacción con el organismo. Una mayor ingesta de calcio, a través de los productos lácteos y los frutos secos, disminuye la capacidad del plomo de sustituir al calcio por competencia. La aparición de anemia es contrarrestada con una mayor ingesta de hierro hémico a través de la carne magra de vaca, el pescado y el pollo. Finalmente, el balance redox del organismo es ayudado con una mayor ingesta de vitamina C, a través de las frutas y los tomates.

Estudios realizados en niños de Montevideo muestran que el factor más importante asociado a un menor nivel de plomo en sangre es el calcio, proveniente, sobre todo, de los lácteos, más que los otros nutrientes (Kordas *et al.*, 2018). A similares conclusiones se llegó a partir de estudios llevados a cabo en la población infantil de Estados Unidos (Desai *et al.*, 2021). La evidencia actual indica que no se puede asociar un alimento determinado a la disminución de plomo en sangre en los niños. Con base en la evidencia existente, la recomendación de una dieta variada y balanceada parece ser lo adecuado para la población infantil.



El plomo hoy: entre el control y el descontrol

Con respecto a la producción mundial de metales, el plomo se encuentra en el quinto lugar, luego del hierro, el cobre, el aluminio y el zinc. Casi todos los compuestos de plomo con mayor solubilidad (tabla 2) tienen algún uso industrial en la actualidad. Por ejemplo, el acetato de plomo se usa en pigmentos y barnices y como reactivo analítico; el cloruro de plomo se usa como catalizador y retardante del fuego; el nitrato de plomo se usa en la manufactura de fósforos y explosivos, estabilizador térmico del nailon, y en la cobertura de papel fototermográfico.

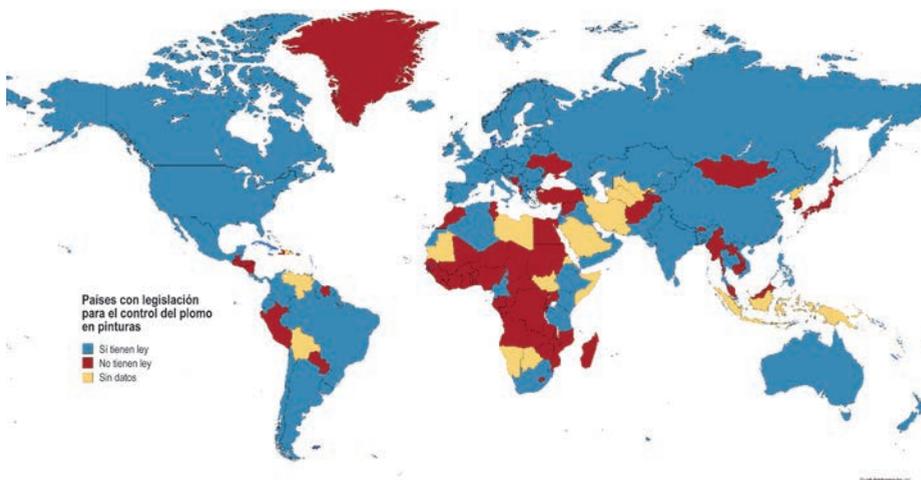
Los compuestos de plomo más insolubles también encuentran aplicaciones en el ámbito industrial. La azida de plomo se utiliza en la manufactura de municiones. El carbonato de plomo se usa como catalizador, y el fluoruro de plomo, en las industrias óptica y electrónica. El fosfato de plomo se usa como estabilizante en la industria plástica, y el sulfato de plomo, en baterías. El óxido de plomo y el sulfuro de plomo se utilizan en cerámicas, y el tetróxido de plomo, en los barnices. Finalmente, cabe señalar que el arseniato de plomo, antiguamente usado como insecticida y herbicida, se ha dejado de utilizar.

3.1. Efectividad de las acciones globales: caminos cumplidos y en tránsito

La toma de conciencia y las acciones coordinadas mundiales han tenido un fuerte impacto en el control del plomo global. Por un lado, la eliminación del plomo de las gasolinas redundó en una inmediata disminución de los niveles de plomo en el aire, que se vio reflejada también en una disminución de la plumbemia en la población infantil (Needleman, 2004).

La efectividad del programa mundial para la eliminación del plomo de los combustibles y los efectos comprobados en la disminución de los niveles de plomo ambiental y en la población alentaron a llevar adelante acciones similares, de carácter global.⁴ A partir de una colaboración entre el Programa de Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP, por sus siglas en inglés) y la Organización Mundial de la Salud, en 2011, se estableció la Alianza Global para la Eliminación del Plomo de las Pinturas (Lead Paint Alliance), con el fin de prevenir la exposición infantil al plomo y disminuir la exposición laboral a las pinturas con plomo. Entre las acciones conducentes a lograr los objetivos planteados, se buscó promover la eliminación de la manufactura de pintura con plomo y se ofreció asesoramiento a los gobiernos para la redacción de leyes de regulación adecuadas. Si bien los avances han sido significativos, los datos actualizados de febrero de 2021 indican que solo un 41 % de los países poseen leyes que regulan el contenido de plomo en pinturas (figura 12).

Figura 12. Mapa de la situación actual con relación a la existencia de normas legales para la regulación del plomo en pinturas. En celeste, los países con regulación legal; en naranja, los países que aún no tienen una regulación legal, y en gris, los países de los que se carece información. Elaborado con datos actualizados de febrero de 2021, de <<https://saicmknowledge.org/content/lead-paint-law-map>>

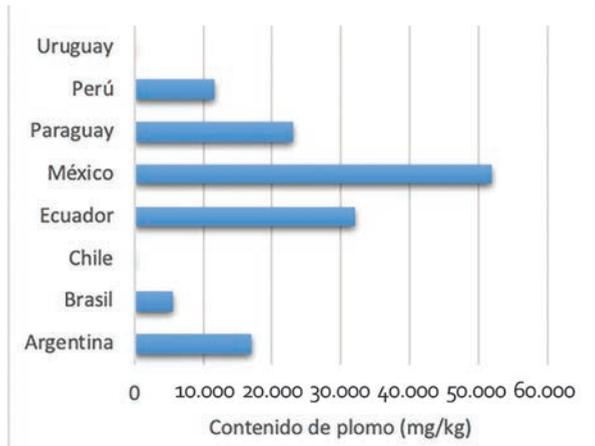


4 Si bien existe un acuerdo general sobre la incidencia benéfica en el ambiente de la eliminación del plomo en las gasolineras, una reciente publicación (Resongles *et al.*, 2021) pone en duda este abatimiento, al haber encontrado niveles de plomo en las partículas dispersas en el aire en la ciudad de Londres similares a los de 1999, por lo que sugiere que el plomo dispersado en el ambiente durante los años de uso de combustibles con tetraetilplomo aún sigue presente.

En Uruguay la legislación para la regulación del plomo en las pinturas entró en vigencia en el año 2005, y al igual que en otros países, también fueron observados los efectos beneficiosos de esta acción (Coussillas *et al.*, 2012). El análisis comparativo del contenido de plomo en pinturas comercializadas en distintos países de América Latina (figura 13) mostró que, a pesar de existir una legislación aprobada que pone un límite máximo de contenido de plomo, se cometen incumplimientos (UNEP, 2013). Solo las pinturas analizadas en Chile y Uruguay cumplían, en promedio, con el valor límite establecido en sus respectivas legislaciones. En el mismo estudio, se establecía que, con respecto al nivel de acción europeo (90 mg/kg), solo las pinturas comercializadas en Uruguay lo cumplían. Al mismo tiempo, se destacaba que la mayoría de las pinturas uruguayas contenían la etiqueta que indicaba el cumplimiento de la legislación sobre el contenido de pintura en plomo, al contrario que el resto de los países.

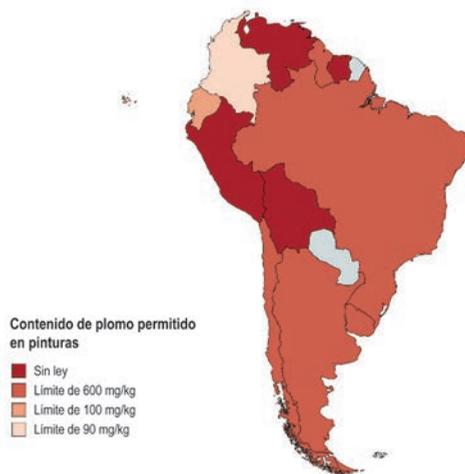
Figura 13. Contenido medio de plomo en pinturas (mg/kg) en productos comercializados en países de América Latina. La flecha roja indica el valor de 600 ppm, adoptado por todas las legislaciones de los países indicados.

Fuente de datos: UNEP, 2013



Los datos actualizados de febrero de 2021 acerca del estado legal del control del plomo en pinturas muestran que la mayoría de los países de América Latina aún mantienen el límite de 600 mg/kg para el contenido de plomo en pinturas, y solo Colombia ha adoptado el nivel de 90 mg/kg una vez aprobada la ley en el año 2020 (figura 14).

Figura 14. Mapa con los límites para el contenido de plomo en pinturas establecidos por la legislación adoptada en diferentes países de América Latina. Los países no coloreados indican que no se disponen de datos. Elaborado con datos actualizados de febrero de 2021, de <https://saicmknowledge.org/content/lead-paint-law-map>



3.2. Las perovskitas de plomo: ¿creando futuros problemas?

A medida que las acciones globales tienden a la eliminación del contacto directo de la población con el plomo y al control de las fuentes para su manejo y remediación, los nuevos avances tecnológicos parecen querer ir por el camino contrario.

Los haluros metálicos de perovskitas poseen propiedades que las hacen ideales para la fabricación de celdas solares. Nuevamente, las propiedades del plomo hacen que la variedad química de perovskitas basadas en plomo, en particular aquellas con la estructura $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbX}_3$ (X = halógeno como yoduro, bromuro o cloruro), tenga las mejores características en cuanto a capacidad de absorción de la luz y factibilidad de confección en capas delgadas, además de su bajo costo.

Los estudios recientes de toxicidad demostraron que los iones plomo (II) libres son más tóxicos que los residuos de perovskitas de plomo (Bae *et al.*, 2019), lo cual, lejos de constituir una ventaja, indica que estos residuos también colaborarán en la diseminación de plomo en el futuro. Antes de continuar con este tipo de desarrollos, sería bueno pensar, desde ya, en sustituir el plomo de este tipo de celdas buscando alternativas (Miyasaka *et al.*, 2020), aunque sea a costa de un menor rendimiento.

3.3. El plomo en el ambiente laboral

La ley 17.774 estipula los sectores laborales en los que los trabajadores pueden verse expuestos al plomo y los clasifica de acuerdo con el grado de exposición:

- *exposición alta*: fabricantes de acumuladores, fabricantes de alambre, trabajadores en el vidriado de alfarería, reparadores de automóviles, desmanteladores de barcos, fabricantes de baterías, fabricantes de cerámicas, mezcladores de combustible, fabricantes de equipos químicos con plomo, fabricantes de estearato de plomo, galvanizadores, fabricantes de insecticidas con plomo, limadores, fabricantes de masilla con plomo, refinadores de metal de desecho, trabajadores de metal de desecho, refinadores de metales, soldadores de metales, trabajadores de planchas de metales con plomo, trituradores de metales con plomo, fundidores de metales no ferrosos, fabricantes de pigmentos para pinturas, pintores con pistola de aire comprimido, trabajadores de plásticos (PVC), fabricantes de contrapesos de plomo, fabricantes de hojas de plomo, fabricantes de pisos de plomo, fabricantes de protecciones de plomo, fabricantes de sales de plomo, fabricantes de tuberías de plomo, fundidores de tuberías de plomo, moldeadores de plomo, recicladores de baterías de plomo, soldadores con soldadura de plomo, trabajadores de molinos de plomo, mezcladores de estabilizadores de PVC, fabricantes de soldaduras, fabricantes de tetraetilo y tetrametilo de plomo, fundidores de tipos de imprenta, ajustadores de tuberías, mezcladores manuales de masa de vidrio;
- *exposición media*: fabricantes de baldosas, bonceadores, empalmadores de cables, fabricantes de cables eléctricos y telefónicos, trabajadores de la central eléctrica, fabricantes de colorantes, electrogalvanizadores, trabajadores en electrotipia, cortadores de metales, pulidores de metales, fabricantes de municiones, trabajadores de refinerías de petróleo, fabricantes de pinturas, plomeros, reparadores de radiadores de automóviles, remachadores, sopladores a soplete, fabricantes de tapas para botella, fabricantes de techadores en vidrio, pulidores de vidrio, sopladores de vidrio plomado, cargadores de hornos de zinc, trabajadores de molinos de zinc;
- *exposición baja*: fabricantes de barnices, tintoreros de calzado, fabricantes de calzado, pulidores de caucho, trabajadores de curtiembres, trabajadores de demoliciones, empleados en recintos para estacionamiento, esmaltadores, operadores de hornos de esmalte, fabricantes de esmalte, fabricantes de hojas de estaño, moldeado-

res en fundiciones, trabajadores de gasolinería, hojalateros, fundidores de latón, linotipistas, litograbadores, pintores, fabricantes de ruedas de esmeril, trabajadores en talleres de vehículos, trabajadores expuestos a virutas metálicas.

Otros lugares no reconocidos específicamente por la ley uruguaya y que pueden constituir de posible exposición son los museos. Debido al amplio uso del plomo en la antigüedad, las diversas piezas museísticas resultan posibles fuentes de plomo (Selwin, 2005). En este caso, los trabajadores expuestos son los investigadores de colecciones, conservadores, curadores, guías y restauradores (Tétreault, 2003).

Finalmente, en el ámbito universitario, en el que las soluciones estándares empleadas con fines analíticos tienen concentraciones de hasta 1000 mg/L, la exposición laboral de los investigadores es controlada anualmente por la División Universitaria de la Salud.

3.4. El plomo en el hogar

Con base en estos controles estatales, podría pensarse que el problema del plomo en Uruguay está resuelto. Sin embargo, existe un reducto en el que el plomo está presente y resulta muy difícil de evaluar: nuestros hogares.

¿Dónde podemos encontrar plomo en nuestros hogares? Los artículos *vintage* (tan de moda actualmente), los juguetes viejos, las pinturas viejas en las paredes y marcos de puertas, la plomería antigua, todas resultan ser fuentes de plomo en nuestro hogar. El problema es que el Estado no puede entrar a nuestros hogares, y, por lo tanto, la responsabilidad final cae sobre la población general, razón por la cual es necesario que la población conozca el problema.

Los utensilios y adornos producidos a base de plomo de fines de los siglos XIX y XX se han convertido, en la actualidad, en objetos de colección o herencia familiar. En tal sentido, a pesar de contener plomo (si es que lo sabemos, puesto que, en general, se desconoce), siguen estando presentes en los hogares por su valor histórico y afectivo.

Otro de los aportes del siglo XIX es la aparición del icónico soldadito de plomo, un regalo típico para niños varones en esos años (Raffaini, 2018). Originalmente de estaño, se comenzó a fabricar con el método *hollow casting*, ideado por William Britain Jr. (1893), que monopolizó la industria de los soldaditos de plomo por muchas décadas. En la actualidad, sus productos son coleccionables. El origen exacto de este juguete es desconocido y quizás se remonte al antiguo Egipto. Sin embargo, nadie puede negar el impacto que ha tenido en la vida de miles

de niños alrededor del mundo. Pese a que la asociación no se ha hecho directamente a nivel académico, es razonable pensar que esta forma de entretener a los niños es parcialmente responsable de la popularización del *wargaming*⁵ y del crecimiento de gigantes del entretenimiento como Games Workshop (Larsen, 2007).

Los juguetes con plomo tampoco son solamente cosas del pasado. Algo similar ocurre con las pinturas con plomo en ciertos artículos de parafernalia. Si bien, desde el punto de vista legal, está prohibida su importación, algunos de estos artículos pueden ingresar al país, ya sea por contrabando o por falta de controles al importarse. A modo de ejemplo, en 2009 un estudio estadounidense reveló que de 95 muestras analizadas de productos para niños destinados a las festividades de Pascua y Halloween, en 12 se encontraron niveles de plomo muy superiores a la norma vigente en sus pinturas (Weidenhamer, 2009). Entre estos juguetes de bajo costo se incluían dentaduras de plástico de fantasía, cuyo modo de juego es justamente llevárselas a la boca.

Siguiendo con los ejemplos de pinturas con plomo, un estudio sobre las pinturas decorativas empleadas en las máscaras pintadas sobre la piel de los actores del teatro chino (Wang *et al.*, 2020) reveló un alto contenido de metales pesados, entre ellos el plomo, con valores máximos registrados de 370 mg/kg. En varios casos, los valores excedían los dispuestos en la reglamentación del plomo en cosméticos. Este tipo de pinturas también aparece en otro gran número de productos misceláneos del cuidado personal, incluidos los cosméticos (Obeng-Gyasi, 2019). Si bien la importación de estos productos contaminados está claramente prohibida, pueden ingresar en el mercado a través del contrabando o por falta de controles.

Otra fuente de contaminación de plomo y por ingesta se encuentra en algunas especias usadas en gastronomía (Baig *et al.*, 2019). Si bien en algunos lugares aún existe la práctica ilegal y negligente de agregar cromato de plomo (color amarillo) a ciertas especias como el cúrcuma, para potenciar su brillo y apariencia (Cowell *et al.*, 2017; Erasmus *et al.*, 2020; Osman *et al.*, 2019), en realidad, la razón principal por la cual se detectan cantidades significativas de plomo en alimentos es el riego con aguas contaminadas, lo cual nos lleva a la siguiente fuente de plomo en el hogar: el agua.

5 *Wargaming* es un formato de juego en que los jugadores simulan batallas en grandes mesas con miniaturas que representan soldados, tanques u otro tipo de unidades en función del juego. Esta afición hace un fuerte énfasis en el armado y pintado a mano del ejército que uno utilice, así como de los elementos que funcionan a modo de escenografía para la batalla.

El uso extendido del plomo en las cañerías galvanizadas, soldaduras, válvulas, medidores, entre otros componentes, constituye otra posible fuente de contaminación en el hogar. Si bien se ha reemplazado un buen número de estos elementos de plomería, aún persisten en varias casas y hogares. Esto es debido, por un lado, al desconocimiento de la población sobre la problemática y, por otro, a un problema económico, dado que el recambio completo de las cañerías supone costos elevados y molestias. El episodio de Flint es una muestra de la gravedad del problema.

La práctica de la pesca va de la mano con una importante fuente de contaminación en el hogar: las plomadas de pesca. Si bien no suponen una fuente importante de contaminación para los ambientes marinos, a menos que queden por un tiempo considerable enterrados como parte del sedimento, en los hogares ha habido casos clínicos de pediatría relacionados con la ingesta inadvertida, que han dado lugar a niños con concentraciones altas de plomo en sangre en apenas 24 horas. Los ácidos gástricos y la bilis provocan la corrosión del metal y profundizan su absorción (Roy y Edwards, 2019). Estos ejemplos muestran cómo estos objetos, aparentemente inofensivos, pueden resultar en problemas mayores si quedan al alcance de niños pequeños.



Técnicas para la detección y cuantificación del plomo en pinturas

Del análisis de las fuentes de contaminación por plomo que detallamos en el capítulo 3, queda claro que una vez encaminadas las soluciones a los grandes problemas (combustibles, pinturas), el hogar aparece como una de las fuentes de mayor importancia (Levin *et al.*, 2021; Sowers *et al.*, 2021). ¿Cómo llevar a cabo los análisis en el hogar si se necesita equipamiento especializado? ¿Cuál sería el costo de hacer todos los análisis necesarios? La respuesta a estas preguntas está en el uso de metodología descentralizada de análisis, que trataremos en detalle en este capítulo, pero antes abundaremos en el concepto detrás de la palabra *descentralización*.

4.1. La descentralización analítica como respuesta

De acuerdo con el último censo de hogares del 2011, en Uruguay hay 1.333.256 viviendas (INE, 2011). Si quisiéramos hacer un relevamiento de todos los hogares, necesitaríamos realizar más de 6.000.000 de análisis, considerando que por cada casa se necesita un mínimo de cinco ensayos, teniendo en cuenta el número de paredes, marcos de puertas o posibles juguetes a los cuales los niños se encuentran expuestos. Este número hace inviable económicamente y en costo de tiempo cualquier política de análisis masivo mediante técnicas de laboratorio tradicionales o, incluso, mediante medidas con equipos portables, los cuales requieren una inversión importante en compra y en personal. Sumado a esto, está también la dificultad logística, dado que los hogares son reductos inviolables, por lo cual cualquier tipo de análisis dentro de las casas requiere de la autorización explícita del jefe o la

jefa de familia. En este contexto, las pruebas colorimétricas cualitativas o semicuantitativas aparecen como una posible respuesta.

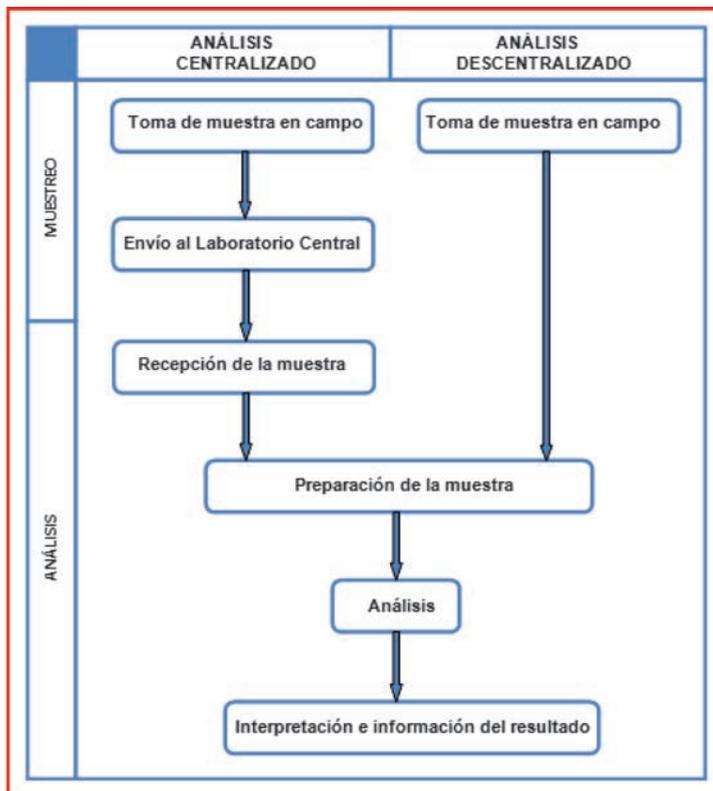
Una posible solución al problema del análisis masivo podría ser trasladar esta responsabilidad al ciudadano. Esto podría incluir el análisis de la calidad del agua que tomamos y de la que se almacena en los tanques, la calidad del material particulado presente en el polvo que aspiramos o el contenido de vitaminas de un alimento (Lisi, Peterson y Gooding, 2020). Una propuesta de ese tenor lleva al asombro y parece un verdadero disparate; sin embargo, las dudas se disipan cuando reconocemos que, en los hechos, la población ya se encarga de algunos análisis, como del cloro de las piscinas o el plomo en las pinturas (para los que se usan kits comerciales), o incluso los análisis de glucosa en sangre y los test de embarazo. En particular, los glucosímetros portátiles son un ejemplo de cómo el análisis químico puede ser llevado a cabo en el hogar (Xiang y Lu, 2011).

Por lo tanto, no resulta inviable que, en un futuro cercano, parte de los análisis constituyan actividades habituales en los hogares. Cabe preguntarse, entonces, qué va a pasar con los grandes laboratorios, los grandes equipos y todos esos años de estudio que tuvimos que dedicar para poder trabajar con ellos. La respuesta no es complicada: esos laboratorios seguirán allí, donde deben estar, con el personal capacitado que deben tener. Pero algunos equipos ya no son tan grandes, y los avances analíticos han llevado los aspectos relacionados con la especificidad y la selectividad a un punto tal que, en la actualidad, se cuenta con procedimientos más robustos y, por ende, posibles de ser usados por gente inexperta. A partir de la introducción de los transistores como componentes de los circuitos electrónicos, el tamaño de estos ha disminuido progresivamente y se espera que, en los próximos años, llegue a su límite inferior. Las grandes computadoras que pusieron al humano en la Luna son obsoletas frente a los teléfonos celulares que llevamos en nuestros bolsillos, y apenas han pasado cincuenta años.

Las técnicas colorimétricas al ojo desnudo son los principales objetivos para el desarrollo de técnicas descentralizadas de uso masivo. El test de embarazo es un ejemplo de ellas, en el que la detección de una línea o dos líneas coloreadas dan la información buscada. Por otro lado, las técnicas electroanalíticas, en las que están basadas los glucosímetros, han sido las grandes beneficiadas de los avances en electrónica, ya que al tratarse de elementos puramente electrónicos (contrarios a los métodos ópticos), los potencióstatos/galvanostatos pueden llegar a medir unos pocos centímetros de lado y pesar menos de 100 g. A esto se debe sumar la posibilidad de operar conectados a una *laptop*, lo que les confiere la capacidad de sacarlos fuera de los laboratorios centra-

les. Para completar el panorama, surgieron los electrodos serigrafados o SPE (del inglés *screen-printed electrodes*), que contienen el sistema electródico completo (electrodos de trabajo, referencia y auxiliar) impreso sobre el plano, lo que facilita aún más el proceso de descentralización analítica. Si a todos estos avances sumamos aquellos que permiten el pretratamiento de la muestra con cartuchos de *clean-up*, nos encontramos, entonces, ante un sistema analítico completamente descentralizable (figura 15).

Figura 15. Esquema comparativo de las etapas de muestreo y análisis para los análisis centralizado y descentralizado. En este último, las etapas de envío, recepción y almacenamiento de las muestras en un laboratorio central son eliminadas, lo que disminuye drásticamente los costos asociados



La aplicación de las acciones globales para eliminar el plomo de las pinturas tiene limitaciones reales que provienen de la dificultad de realizar análisis centralizados. Aun en lugares donde existe una normativa, el plomo todavía sigue presente en casas con pinturas antiguas y descascaradas, cañerías o en artículos como juguetes viejos y baterías. Esta exposición al plomo ocurre en el hogar, donde los más afectados son los niños en etapa de crecimiento, como se ha mencionado

anteriormente. Dado que el hogar es un reducto inviolable, la detección del plomo en este recinto requiere de la colaboración de las familias que lo integran. Asimismo, el gran número de hogares hace inviables políticas masivas de análisis que no incluyan el uso de técnicas descentralizadas, rápidas, de bajo costo y sin la necesidad de personal altamente calificado. Por estos motivos, surge la demanda de técnicas analíticas confiables pero descentralizadas que permitan evaluar con exactitud la concentración de plomo en pinturas, cruciales para orientar las tomas de muestra.

4.2. Métodos analíticos convencionales

Una posible clasificación de los métodos analíticos consiste en agruparlos según tres enfoques diferentes:

1. métodos colorimétricos cualitativos o semicuantitativos;
2. métodos cuantitativos portátiles;
3. métodos centralizados de laboratorio.

Cada una de estas tecnologías tiene sus ventajas, desventajas y limitantes para su implementación (tabla 3). Sin embargo, ninguna es excluyente, todo lo contrario: un plan masivo de evaluación de la presencia del plomo en el hogar necesitará de la complementariedad de los tres enfoques de manera de poder llegar a toda la población afectada, manteniendo un compromiso de costos y de tiempo de análisis. Dentro de cada grupo la elección del método dependerá del nivel de exactitud, del límite de detección requerido, del tipo de muestra a analizar (pintura fresca, pintura seca, medida superficial, tamaño de la muestra, disponibilidad o no del personal capacitado y los recursos económicos disponibles).

Tabla 3. Resumen de algunos de los métodos analíticos más empleados para determinar el contenido de plomo en pinturas

| Método | Ejemplos | Ventajas | Desventajas y limitaciones |
|---------------------------------|--|---|---|
| Ensayos colorimétricos | Estuches de pruebas químicas Kits comerciales Método del trapo húmedo | Simples; requieren poca o ninguna capacitación Resultados inmediatos Bajo precio Medidas <i>in situ</i> El método del trapo húmedo rara vez da falsos negativos | Cualitativos o semicuantitativos Exactitud limitada Se pueden analizar solamente capas superficiales Pueden dañar la superficie Es difícil evaluar el cambio de color para pinturas muy oscuras Pueden dar falsos positivos, que deberán ser verificados con otras técnicas Algunos métodos comerciales pueden dar falsos negativos si no se aplican correctamente Algunos métodos comerciales son tóxicos e incluso contienen plomo en su formulación |
| Métodos cuantitativos portables | Espectrometría de fluorescencia de rayos X (equipo portable) Métodos electroquímicos. Voltamperometría de <i>stripping</i> anódico | Exactitud y precisión adecuada para descartar falsos positivos Relativamente simples, aunque se requiere una mínima capacitación del operario Resultados inmediatos Bajo costo de funcionamiento, aunque se requiere una inversión moderada en la compra del equipo portable La técnica por fluorescencia no daña las superficies pintadas y es rápida Medida <i>in situ</i> | El margen de error es potencialmente mayor que el obtenido por pruebas de laboratorio Requieren algún grado de capacitación o certificación del personal Requieren una inversión inicial La técnica de fluorescencia de rayos X no permite medir la concentración de plomo en objetos pequeños ni en superficies muy curvas, lo que deja fuera el análisis de muchos juguetes La técnica electroquímica requiere una porción de pintura y un proceso de digestión para extraer el plomo de esta |
| Pruebas de laboratorio | Espectrometría de fluorescencia de rayos X (equipo de mesada) Absorción atómica Espectroscopia de plasma inducido (<i>inductively coupled plasma spectroscopy</i>) | Métodos más precisos y confiables No tienen limitaciones técnicas | Costo relativamente elevado La respuesta no es inmediata Es necesario transportar la muestra Se requiere dañar la superficie |

4.2.1. MÉTODOS COLORIMÉTRICOS CUALITATIVOS O SEMICUANTITATIVOS

Algunas empresas extranjeras comercializan estuches de pruebas químicas basadas en el cambio de color que se produce en presencia de iones plomo (Battelle, 2012). La mayoría de estas son de tipo positivo/negativo y generalmente se aplican mediante algún tipo de hisopo que ya contiene el reactivo específico. Estos métodos incluyen algún componente disolvente o un ácido débil, debido a la relativamente buena solubilidad de los compuestos de plomo en este medio.

Dado que la concentración de plomo en la gran mayoría de las pinturas antiguas es elevada en comparación con la sensibilidad de estas técnicas (O'Connor *et al.*, 2018), la probabilidad de incurrir en falsos negativos es baja (Battelle, 2012). No obstante, cuando el sensor se aplica sobre la superficie de la pintura, ya sea porque la aplicación no llega a alcanzar la capa que contiene plomo, el usuario no abarca la superficie necesaria o no espera un tiempo prudente para observar el cambio de color, podría, en cualquiera de los casos, dar lugar a falsos negativos y la falsa confianza de estar protegidos. También pueden ocurrir casos dudosos, sobre todo en el análisis de pinturas con colores oscuros o similares al color que determina la prueba positiva. El porcentaje de estos falsos positivos dependerá de la experiencia del usuario, de la concentración de plomo y el estado de la pintura, y de la sensibilidad del método colorimétrico determinado por el fabricante.

En algunos países los estuches para la determinación de plomo en el hogar están regulados. En Estados Unidos, por ejemplo, deben detectar concentraciones superiores al 0,5 % del peso de plomo (5000 mg/kg) o su equivalente de 1 mg/cm² si se trata de una superficie pintada (EPA, 2008). Esta concentración mínima es insuficiente respecto a la legislación de este país, que establece un máximo de 90 mg/kg de plomo en pinturas, e incluso también para Uruguay, donde el límite es de 600 mg/kg.

Estas pruebas colorimétricas son relativamente baratas, en comparación con un análisis de laboratorio, y tienen la gran ventaja que pueden emplearse por cualquier persona siguiendo el manual de usuario. No obstante, en la mayoría de los casos son ensayos de un solo uso, por lo que el costo total al analizar un hogar puede escalar rápidamente si se realizan múltiples mediciones. El método posee algunas limitaciones en cuanto a la cuantificación de plomo. Si bien algunos kits comerciales permiten evaluar la concentración del contaminante, la precisión es baja y la medida depende de varios factores, como el área de superficie evaluada, la facilidad de transferencia del plomo de la pintura al reactivo, la presión ejercida por el usuario sobre la superficie a evaluar,

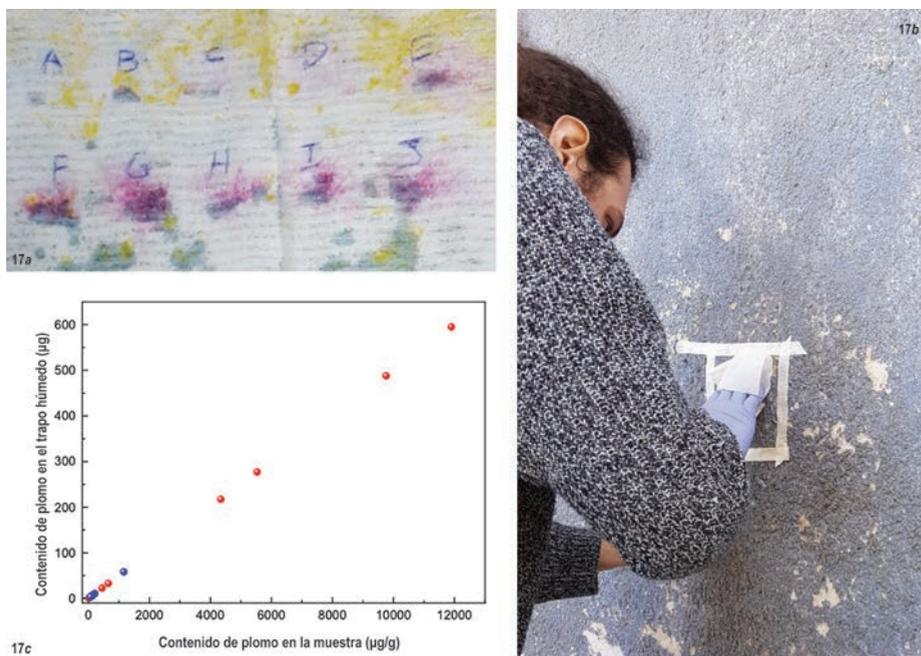
la evaluación cualitativa del cambio de color, el color de la pintura a analizar, etcétera. Algunos fabricantes agregan unas gotas de agente activador para mejorar la extracción del plomo de las paredes de yeso (Battelle, 2012); sin embargo, se han reportado dificultades a la hora de determinar si el producto fue aplicado correctamente, por lo que es otra fuente de falsos negativos. Además de todas estas limitantes, algunos químicos empleados son tóxicos o incluso pueden contener plomo en su formulación.

Más allá de los kits comerciales, dentro de este grupo también se encuentra el método del trapo húmedo o *dust wipe method* (DWM, por sus siglas en inglés) (NIOSH, 2003). Este ensayo fue desarrollado y aprobado por el Instituto Nacional de Salud Ocupacional y Seguridad de Estados Unidos (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH) como control cualitativo. La técnica emplea el cambio de color selectivo que se genera por la reacción química entre el rodizonato de sodio (o potasio) con los iones plomo (II) en un medio ácido. Para ello, el protocolo involucra, primero, la transferencia de partículas de pintura de un área de la muestra previamente delimitada a una toalla absorbente (trapo húmedo) (figura 16b). Luego, se aplica una disolución diluida de ácido nítrico o acético (vinagre) que permite solubilizar las sales de plomo y liberar los iones plomo (II), y, finalmente, la presencia de plomo se revela por el cambio de color tras aplicar una pulverización de una disolución fresca de rodizonato de sodio (Ashley, Wise y Esswein, 2011). Si el plomo está presente, se observará la aparición de un color violeta rojizo, con una intensidad proporcional al contenido de plomo (figura 16a). La ventaja de la técnica es que la cantidad de plomo que es capaz de extraer de una variedad de muestras que contienen plomo guarda una fuerte proporcionalidad con el contenido de plomo en la muestra (figura 16c), por lo que pueden hacerse estimaciones semicuantitativas del contenido de plomo en la muestra (Ashley, Wise y Esswein, 2011). Esta técnica es mucho menos costosa, incluso que los kits comerciales, y permite incrementar el número de análisis por hogar, y el entrenamiento básico para su uso es fácil de implementar. Otra ventaja de la técnica es que presenta un bajo límite de detección, por lo que es suficiente para la reglamentación uruguaya vigente (Poder Legislativo, 2011). En la sección 4.4 se muestra un ensayo preliminar realizado en 50 hogares de Montevideo y Canelones por el grupo de Biomateriales de la Facultad de Ciencias, con una adaptación de la técnica DWM (Ansin *et al.*, 2019).

Figura 16a. Imagen del revelado colorimétrico sobre una toallita de acuerdo con el método DWM empleando rodizonato de sodio. La concentración de plomo en solución es, de la A a la J, de 1, 2, 5, 7, 10, 20, 40, 60, 80 y 100 $\mu\text{g/L}$. La aparición del color violeta rojizo evidencia la presencia del plomo

Figura 16b. Delimitación del área a analizar mediante el método DWM (Ansin *et al.*, 2019). Reproducido con permiso de The Royal Society of Chemistry

Figura 16c. Relación entre el contenido de plomo medido por el método DWM y el medido por los métodos centralizados, en la que se demuestra que la cantidad recuperada de plomo sobre el trapo humedecido mantiene una proporcionalidad con el contenido de plomo total en la muestra. Gráfica elaborada a partir de datos publicados en Ashley *et al.* (2011)



4.2.2. MÉTODOS CUANTITATIVOS PORTÁTILES

Dentro de este grupo encontramos la voltamperometría de desorción anódica (SWASV, por sus siglas en inglés) y la espectrometría de fluorescencia de rayos X (Ashley, 2010). A diferencia de los métodos colorimétricos anteriores, este tipo de equipamiento ofrece un mayor grado de confiabilidad y permite no solo la detección, sino también la cuantificación del plomo presente en la muestra. El análisis por cualquiera de estas metodologías tiene un costo relativamente bajo por muestra, pero requiere una inversión inicial moderada a la hora de comprar el equipamiento necesario. Las medidas pueden realizarse *in situ*, aunque se necesita una capacitación mínima del personal que realiza el análisis.

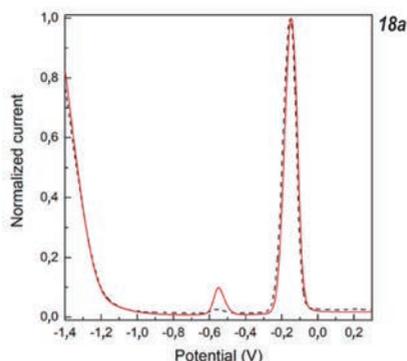
4.2.2.1. Voltamperometría de desorción anódica

La SWASV es una técnica electroquímica empleada para la cuantificación de metales. Está basada en la electrodesorción del metal depositado sobre un electrodo, que da lugar a la aparición de una señal, cuya posición depende del potencial redox de la especie analizada. La técnica se divide en dos etapas. Primero, se aplica, sobre el electrodo de trabajo, un voltaje constante durante un tiempo determinado y a un potencial de reducción ligeramente inferior al potencial redox del analito (cronoamperometría), que genera que el catión se reduzca y deposite sobre el electrodo de trabajo en su forma metálica. Para el caso particular de los iones plomo (II), la electrodeposición mejora enormemente si previamente se deposita una delgada capa de mercurio o bismuto (en la actualidad, el uso del mercurio está limitado debido a su toxicidad) sobre el electrodo de trabajo, generalmente compuesto de grafito o carbono vítreo.

Una vez depositados los metales, la respuesta del sensor se logra mediante una segunda etapa, en la que se aplica un barrido de potencial de onda cuadrada desde un valor de reducción pasando por el potencial de oxidación del plomo metálico. Al oxidarse la especie depositada, se genera una corriente de electrones que aparecen como picos en el voltamperograma. Este proceso se conoce como *desorción*, y la primera señal es la correspondiente al pico de oxidación del plomo (0) depositado pasando a plomo (II), mientras que la segunda corresponde a la electrodesorción del bismuto (figura 17a). La intensidad de la señal dependerá, básicamente, del área del electrodo, la velocidad de barrido, el tiempo empleado en la electrodeposición, la velocidad de agitación de la muestra, el efecto matriz y la concentración de plomo en solución. Si se fijan todos los parámetros anteriores menos el último, mediante el método de adiciones estándar, es posible determinar la concentración de plomo en solución.

Figura 17a. Señales obtenidas con la técnica electroquímica SWASV, en las que se exhiben los dos picos característicos de una muestra de pintura que contiene plomo (II) (línea roja) y su correspondiente control en ausencia de plomo (línea punteada). Adaptado de Ansin *et al.* (2019) y reproducido con autorización de la Royal Society of Chemistry

Figura 17b. Sistema descentralizado electroquímico empleado en los estudios electroquímicos. Como se observa, el sistema puede ser controlado desde una XO del Plan Ceibal. Fotografía tomada por E. Méndez



La sensibilidad de la técnica depende de los parámetros anteriormente mencionados, que afectan la intensidad de las señales, pero especialmente de la primera etapa de electrodeposición del metal, por lo cual, en principio, es posible ampliar el límite de detección y cuantificación a costa de un mayor tiempo de análisis (Ashley *et al.*, 1998).

En el pasado esta técnica era considerada de laboratorio debido al equipamiento empleado; sin embargo, con la miniaturización de los dispositivos electrónicos, hoy en día se cuenta con electrodos pequeños e incluso descartables, así como también con potenciostatos de bolsillo, por lo que es una técnica portátil.

Aunque la técnica es relativamente sencilla y descentralizada, la necesidad de realizar una curva de adiciones estándar y de digerir una porción de la muestra demanda un mayor grado de capacitación que para otro tipo de técnicas.

4.2.2.2. Espectrometría de fluorescencia de rayos X

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica basada en la emisión de rayos X, que se produce cuando el plomo es expuesto a la irradiación de altas energías, lo que genera una respuesta característica del elemento. La intensidad de la señal puede relacionarse con la cantidad de plomo por unidad de superficie. Estos equipos son relativamente sencillos de usar, permiten un análisis *in situ* de la muestra

y no dañan la superficie de las pinturas. Sin embargo, tienen un costo moderado y requieren de personal calificado.

Los equipos de fluorescencia son precisos, aunque el margen de error puede ser mayor que el de otras técnicas de laboratorio, y solamente analizan la pintura superficial. La principal limitante se encuentra en que la técnica requiere un área plana y relativamente grande sobre la cual realizar la medida, lo cual inviabiliza el análisis de superficies curvas o pequeñas, como sucede en el caso de las pinturas en juguetes y otros artículos.

4.3. Métodos centralizados de laboratorio

Dentro de este grupo se engloban las técnicas de medida más precisas. El límite de detección es variable dependiendo del tipo o variante de la técnica y el origen de la muestra, pero se encuentra en el orden de los 10-200 $\mu\text{g}/\text{kg}$, lo cual se halla muy por debajo de los límites empleados en pinturas. Por ser más precisas y exactas que las técnicas de campo, son consideradas técnicas confirmatorias y no tienen limitaciones de la muestra, como sucede con la espectrometría de rayos X. En contrapartida, aumentan los costos asociados debido a la necesidad de contar con un laboratorio certificado y personal capacitado. Si bien los equipos pueden procesar varias muestras en pocos minutos, estas medidas son lentas debido a que las muestras deben ser transportadas al laboratorio, donde se realiza el análisis, y, por tanto, son inviables para un programa masivo de análisis.

4.3.1. ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA POR LLAMA

La espectrometría de absorción atómica por llama (AAS, por sus siglas en inglés) se basa en que distintos elementos químicos presentan una absorción de luz a distintas longitudes de onda, y esta es la característica del elemento químico que se desea estudiar. Para el caso del plomo, esta señal sale a 283,3 nm en estado basal. La intensidad de luz absorbida puede correlacionarse de manera lineal con la concentración de analito en la muestra. Para extraer el plomo de la matriz de la muestra, se realiza una atomización sobre una llama de acetileno y aire u óxido nítrico a temperaturas de 2600°C.

4.3.2. ESPECTROMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA POR HORNO DE GRAFITO

La espectrometría de absorción atómica por horno de grafito, a diferencia de la anterior, sustituye el uso de una llama por un tubo de grafito, el cual se calienta a una temperatura de hasta 3000°C mediante una corriente eléctrica. Esta técnica permite bajar los límites de detección y, por tanto, requiere de un menor volumen de muestra. Sin embargo, puede presentar un mayor número de interferencias que los métodos de llama, aunque este efecto se compensa con la mayor sensibilidad, que permite trabajar con muestras más diluidas, por lo que se disminuye, así, el efecto matriz.

4.3.3. ESPECTROMETRÍA DE EMISIÓN ATÓMICA CON FUENTE DE PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCTIVO

La espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma de acoplamiento inductivo emplea un gas ionizado a alta temperatura para disociar la muestra en sus átomos. En estas condiciones, el plomo emite luz a longitudes de onda características, cuya intensidad puede correlacionarse con la concentración de la muestra. A diferencia de otros tipos de espectrometrías atómicas, la técnica es relativamente costosa, particularmente por el argón empleado en la medida.

4.3.4. ESPECTROMETRÍA DE MASAS DE PLASMA INDUCIDO

En el análisis por plasma inducido, las muestras líquidas son aerolizadas en un nebulizador y dirigidas hacia una fuente de calor a alta temperatura (por ejemplo, plasma de argón) para ionizar los elementos de la muestra y excitar los electrones de los átomos individuales. Estos átomos ionizados se separan de las partículas neutras en una cámara de vacío de acuerdo a su relación carga/masa, lo que permite su identificación por un espectrómetro de masas.

Esta técnica es más sensible que la de AAS, tiene una mayor flexibilidad a la hora del análisis multielemento y puede alcanzar límites de detección del orden de las partes por trillón.

4.4. Trabajo en campo: detección de plomo en hogares de Montevideo y Canelones

En el año 2019, se llevó a cabo un trabajo conjunto entre el Laboratorio de Biomateriales de la Facultad de Ciencias (Universidad de la República), el Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM), la institución El Abrojo y la Intendencia de Montevideo (IM). Con la conformación de un equipo interdisciplinario, que incluía personal de todas estas instituciones, se llevaron adelante inspecciones autorizadas en 50 hogares de la ciudad de Barros Blancos (Canelones) y el barrio La Esperanza (Montevideo) (figura 19). Los jóvenes de la institución El Abrojo recibieron el entrenamiento, en la aplicación, del DWM y participaron activamente de las inspecciones, en las que se pudo detectar la presencia de plomo en paredes, marcos de puertas y ventanas de algunos hogares. Simultáneamente, el MIEM y la IM llevaron a cabo las acciones correctivas, y los niños habitantes de esos hogares entraron en los programas de las Unidades Pediátricas Ambientales de la Administración de los Servicios de Salud del Estado. De esta manera, en un único acto de inspección, se detectó la contaminación con plomo, se corrigió el problema y se atendió a la población afectada (figura 18*b* y *d*). Con esta actividad, hemos podido demostrar la ventaja del empleo de metodologías analíticas de campo: se requirió únicamente de una valija portátil (figura 18*a*), cuyo contenido se detalla en la tabla 4.

Figura 18a. Contenido de la valija portátil para la realización de las inspecciones en campo utilizando el método DWM

Figura 18b. Equipo de inspección, integrado por la Facultad de Ciencias, el MIEM y la IM, junto con la institución El Abrojo

Figura 18c. El máster en Ciencias Giovanni Galletta, estudiante de doctorado en la detección descentralizada de plomo, junto a una integrante de la institución El Abrojo

Figura 18d. Uno de los autores, analizando el marco de una puerta de una vivienda del barrio La Esperanza con el método DWM. Fotografía 18a tomada por A. Ansin, y fotografías 18b a 18d tomadas por E. Méndez



Tabla 4. Contenido mínimo de la valija para inspección *in situ* de viviendas y lugares de trabajo con el método del trapo húmedo

| Ítem | Propósito |
|------------------------|--|
| Toallitas húmedas | Obtención de la muestra de la superficie analizada |
| Cinta de carpintero | Delimitación de la zona de análisis |
| Guantes de nitrilo | Protección personal y de la muestra |
| Solución ácida | Solubilización de las sales de plomo |
| Solución de rodizonato | Detección de la presencia de iones plomo (II) |
| Bolsas de descarte | Descarte del material usado o contaminado |

De un total de 50 casas inspeccionadas (Ansin *et al.*, 2019), un 82 % resultó libre de plomo mediante la técnica del DWM (una técnica de muy bajo costo), por lo que solo fue necesario analizar el 12 % de las muestras con la técnica electroquímica, incluidas las muestras positivas y dudosas (figura 19).

Figura 19. Efectividad del estudio realizado en el barrio La Esperanza y la ciudad de Barros Blancos sobre un total de 50 hogares. El DWM detectó la presencia de plomo en cuatro hogares y dio un resultado dudoso en otros cinco hogares. La confirmación posterior de estas nueve muestras por el método SWASV indicó que las muestras dudosas eran negativas y las positivas eran, efectivamente, positivas. El uso del DWM permitió reducir el número de análisis centralizados en el laboratorio de 50 a 9. Datos obtenidos de Ansin *et al.* (2019) y reproducido con autorización de la Royal Society of Chemistry

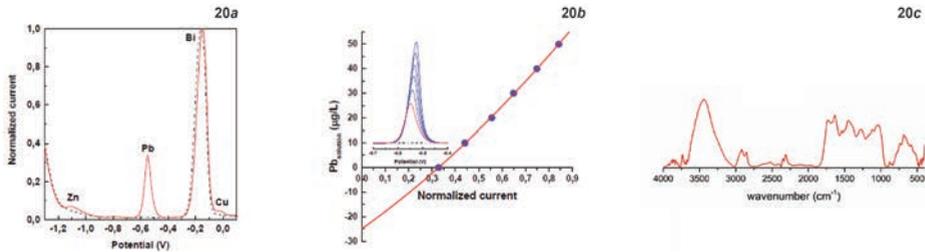


Estos resultados dan cuenta de una disminución drástica en los costos globales de análisis de plomo y de la posibilidad de inspecciones masivas a un coste razonable para el Estado. Como confirmación adicional, se empleó la técnica de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier para identificar la composición de la pintura. Un ejemplo completo de resultados analíticos sobre la pintura vieja encontrada en una casa de Montevideo se muestra en las figuras 20a, 20b y 20c.

Figura 20a. Análisis por swsav de una muestra de pintura llevado a cabo sobre un electrodo de película de bismuto (Bi), en el que se detectó la presencia de zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu)

Figura 20b. El análisis cuantitativo se hizo por el método de adiciones estándar inverso, que arrojó un valor de 30.000 mg/kg de plomo en la pintura (límite admisible: 600 mg/kg)

Figura 20c. Por la técnica de espectroscopía de infrarrojo, se detectó la presencia de cromato de plomo en la pintura, junto con aceite de linasa como medio de dispersión. Adaptado de Ansin *et al.* (2019) y reproducido con autorización de la Royal Society of Chemistry



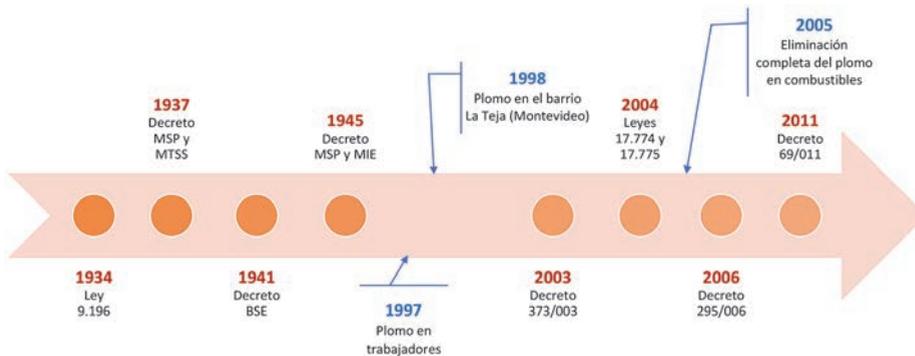


Legislación, enseñanza y divulgación

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el riesgo de la contaminación del metal era ampliamente conocido desde la Antigüedad. Sin embargo, debido a que la contaminación del metal generalmente transcurre por un proceso lento de bioacumulación, sus efectos se observan con el tiempo y con síntomas inespecíficos, por lo que se desestima el riesgo que tiene para la salud humana. A su vez, las propiedades destacables del metal desde un punto de vista utilitario, la falta de un sustituto apropiado en obras de arte y su continuado uso por la industria dificultan su eliminación de nuestras actividades cotidianas. Es quizás por todos estos motivos que la legislación y regulación también han avanzado de forma paulatina. Dentro de este contexto hay que tener en cuenta que recién hacia fines de la década de los noventa se empezó a tomar en serio el problema de la contaminación en el hogar. Hasta entonces, la reglamentación estaba enfocada solamente en mitigar los efectos de la contaminación y controlar a los trabajadores expuestos, y si bien desde la academia se conocía que el plomo es permeable a la vida cotidiana, por fuera de esta órbita tuvo que pasar un cierto tiempo para el reconocimiento público del problema como crónico de nuestra sociedad.

En este capítulo realizaremos un resumen de las distintas reglamentaciones, decretos y leyes implementadas en nuestro país que buscan mitigar el problema de la contaminación por plomo atacando distintos frentes (figura 21). Estas medidas han permitido bajar los porcentajes de personas afectadas. El siguiente paso, no obstante, consiste en la eliminación del plomo en el hogar, para el cual se deberá hacer énfasis en otros aspectos no legales como la difusión y la enseñanza sobre cómo aprender a convivir con el plomo.

Figura 21. Línea de tiempo de las leyes y decretos nacionales relacionados con el plomo y la plombería, cuyo contenido se indica en el texto; se indican también algunos hitos vinculados al tema. Abreviaturas: MSP, Ministerio de Salud Pública; MTSS, Ministerio de Trabajo y Seguridad Social; BSE, Banco de Seguros del Estado; MIE: Ministerio de Industria y Energía



5.1. Legislación vigente

Si bien el saturnismo es una enfermedad conocida desde hace décadas, en el ámbito nacional el riesgo como enfermedad profesional se estableció recién a partir del año 1934, dentro de la ley 9196 Caja de Jubilaciones de la Industria, Comercio y Servicios Públicos (Poder Legislativo, 1934). Por ese entonces, no había legislación alguna en cuanto al manejo y disposición de los residuos que contenían plomo y las condiciones laborales eran precarias. Más aún, muchas fábricas eran empresas familiares, por lo que la población expuesta no solamente se limitaba al trabajador en cuestión, sino también a los restantes integrantes del hogar y su hábitat. El reconocimiento del saturnismo como enfermedad profesional permitió que en los años subsiguientes se implementaran medidas para combatir la epidemia. En 1937 apareció el decreto del Ministerio de Salud Pública y del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social sobre las medidas preventivas del saturnismo, cuyos lineamientos generales establecieron el control de las condiciones de trabajo del personal mediante inspecciones periódicas, controles médicos y accesibilidad a elementos de protección personal (Mañay *et al.*, 2008). En los años subsiguientes, 1941 y 1945, se incrementaron las políticas destinadas a identificar los casos de saturnismo: primero, con el decreto del Banco de Seguros del Estado que estableció la obligatoriedad de la denuncia; luego, con el decreto del Ministerio de Salud Pública y el Ministerio de Industria y Energía que determinó la obligatoriedad de la periodicidad de los exámenes médicos. Estas medidas permitieron disminuir el número de casos de saturnismo, y con ellos se pensó que el problema estaba solucionado.

En la década del noventa, las investigaciones realizadas en la Facultad de Química (Universidad de la República, Udelar) prendieron algunas alarmas. La determinación de plomo en sangre en trabajadores expuestos al plomo demostró que un 60 % de ellos tenían concentraciones de plomo por encima del límite permitido en esos años, a la vez que se pudo establecer una correlación con el riesgo ocupacional en el lugar de trabajo (Mañay *et al.*, 1993). Posteriormente, un estudio que incluyó la determinación de plomo en sangre de niños habitantes en zonas urbanas, suburbanas y rurales, con diferente grado de exposición a ambientes industriales, demostró que un 36 % de los niños y un 39 % de las muestras del agua corriente analizadas se encontraban por encima de los límites de plomo establecidos en el momento de la realización del estudio (Schütz *et al.*, 1997). Un estudio equivalente llevado a cabo en el complejo Euskal Erría en Montevideo analizó la incidencia de una fundición cercana en el contenido de plomo en sangre de la población y encontró también valores por encima de los límites admitidos (Cousillas *et al.*, 1998). El estudio que finalmente tuvo una enorme repercusión periodística fue el realizado en el barrio La Teja de Montevideo, cuya proximidad a la bahía portuaria de Montevideo y a la refinería de petróleo de ANCAP hacía previsible una alta contaminación con plomo (Mañay, Alonzo y Dol, 2003; Mañay, Pereira y Cousillas, 1999).

El impacto de estos estudios aceleró la implementación de leyes de regulación del plomo (Mañay *et al.*, 2008), acompasando la tendencia mundial sobre una mayor conciencia de los países frente a la contaminación del plomo. En 2003, en Uruguay, se aprobó el decreto Regulación del Manejo y Disposición de Baterías de Plomo y Ácido Usadas o a Ser Desechadas (Poder Ejecutivo, 2003). En el año 2004, se aprobó la ley 17.774 (Poder Legislativo, 2004a), de análisis de la dosificación de la plumbemia, y la ley 17.775 (Poder Legislativo, 2004b), de prevención de la contaminación por plomo. La primera obliga a controlar la salud de los trabajadores mediante análisis clínicos de plumbemia. También obliga a las empresas a disponer de vestuarios y del equipamiento necesario para proteger al trabajador de la exposición al metal pesado. Asimismo, establece lineamientos generales sobre las precauciones que se deben emplear en la gestión de los residuos y materiales que contengan plomo. La segunda ley limita el uso del plomo en los combustibles a un máximo de 13 mg/L, en la comercialización de pinturas con fines arquitectónicos, en envases para alimentos y en cañerías o tuberías para uso humano, animal o de riego, prohíbe el uso del plomo en juguetes y establece la obligatoriedad del etiquetado de los productos que contengan plomo. También faculta al Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente a controlar aquellas industrias

que emplean el plomo en alguno de sus procesos productivos. Estas leyes son, quizás, las que permitieron, entre otras cosas, disminuir de forma significativa la concentración de plomo a la cual estaba expuesta la población en su conjunto, particularmente los trabajadores.

En el año 2006 se aprobó el decreto 295/006, Carné de Salud. Dosificación de Plombemia (Poder Legislativo, 2011). Este decreto derogó el anexo I de la ley 17.774, que establecía la obligatoriedad de incorporar el análisis de plumbemia en el carné de salud de los trabajadores expuestos en refinerías y gasolineras. Si bien este decreto podría suponer un aparente retroceso, no es tal, dado que la eliminación de los controles se justifica con la eliminación completa del tetraetilo de plomo en los combustibles, con la excepción exclusiva de algunas gasolinas destinadas a la aviación; sí se mantienen los análisis de plumbemia.

En 2011 se constituyó la Alianza Global para la Eliminación de Plomo en Pintura y en Uruguay se estableció el decreto 69/011 (Poder Legislativo, 2011), que limita el contenido de plomo en pinturas y barnices a una concentración máxima de 600 mg/kg (se excluyen las pinturas con fines industriales, las usadas en la señalética vial, vehículos, puentes y obras portuarias, y aquellas con valor histórico o artístico). Si bien el límite establecido es inferior al de otros países, aún sigue siendo alto en comparación con los objetivos impulsados por la Organización Mundial de la Salud (OMS), que sugiere bajar los niveles de plomo en pinturas a 90 mg/kg. Pese a esto, aún son pocos los países que han llegado a establecer estos niveles en la reglamentación.

Hoy en día, más allá de los pasos siguientes que puedan surgir en materia legislativa, ya sea bajando los límites de concentración permitida o estableciendo un mayor número de políticas de control, el verdadero desafío se encuentra en la detección del plomo en el hogar. Para esto será necesario un encare del problema desde la perspectiva de la educación de la población. Concientizar a las personas sobre este enemigo silencioso, cuyos efectos nocivos muchas veces se camuflan con otro tipo de enfermedades, es una prioridad. En este sentido, es también importante entender por qué durante muchos años el problema de la plumbemia apareció como secundario o escondido frente a otro tipo de contaminantes. Si bien a altas concentraciones de plomo en sangre se produce el saturnismo, con un cuadro clínico definido y de relativamente fácil diagnóstico, cuando la concentración es baja, la sintomatología no es tan clara, puesto que aparecen síntomas comunes a otras enfermedades (Laborde *et al.*, 2006). Por este motivo, la educación es un elemento fundamental en el combate de la enfermedad a largo plazo.

5.2. Enseñanza

Todo problema que afecte a una comunidad encuentra en la enseñanza y la divulgación un sostén importante para su resolución. En el caso del plomo, la necesidad de informar a la población sobre esta temática resulta clave, ya que una población bien informada es capaz de cuidarse a sí misma, a la vez que le permite ser crítica frente a la información —a veces, alarmista— que se produce en torno al tema. Existen diferentes metodologías propuestas para acercar la temática del plomo a los estudiantes, en diferentes niveles de educación y con distintos grados de participación de los estudiantes en el proceso de aprendizaje (figura 22).

Figura 22. Principales metodologías para la enseñanza de los temas relacionados con la contaminación de plomo, que incluyen la participación activa de los estudiantes



5.2.1. TRABAJO EN EL LABORATORIO

Una propuesta educativa, de 1976, planteaba el uso de pigmentos a base de plomo para ilustrar varios principios químicos a través de sus reacciones (Daines y Morse, 1976). Afortunadamente, el trabajo educativo en el laboratorio químico con sustancias coloreadas ha sido sustituido por propuestas muy interesantes basadas en pigmentos naturales o compuestos sintéticos no contaminantes (Blatti *et al.*, 2019), en el marco de los principios de la química verde (Zimmerman *et al.*, 2020).

Todas estas prácticas pueden utilizarse también como excusa para la introducción de la problemática del plomo y para aportar a la idea de que los pigmentos clásicos a base de plomo pueden ser efectivamente sustituidos.

5.2.2. APRENDIZAJE A TRAVÉS DEL SERVICIO (*SERVICE LEARNING*)

Se trata de una actividad fuera del salón de clases, voluntaria, que incorpora el estudio académico suplementado con una actividad en la que los aprendizajes resulten en un beneficio para la comunidad. Tiene la ventaja de que el estudiante deja de tener una actividad pasiva en la adquisición de conocimientos para aplicarlos a la solución de problemas reales, pasando los conceptos abstractos a la realidad. Este tipo de actividades está incorporado, de forma obligatoria, en las carreras que dicta la Udelar y, como tal, redundan en créditos académicos.

Una experiencia concreta de esta metodología fue llevada a cabo por la Universidad de Utah, de Estados Unidos, en la que estudiantes de primer año organizaron charlas para los vecinos de barrios antiguos para informarles del problema de las pinturas viejas y tomaron muestras para analizar cualitativa y cuantitativamente. Los autores destacan el nivel de entusiasmo alcanzado por los estudiantes al enfrentar un problema real con soluciones surgidas de sus conocimientos (Kesner y Eyring, 1999).

5.2.3. PENSAMIENTO SISTÉMICO (*SYSTEM THINKING*)

El pensamiento sistémico es una aproximación holística al análisis de todas las partes de un sistema y cómo se interrelacionan (Matlin *et al.*, 2016). Esta mecánica de estudio de un problema parece particularmente útil para analizar la temática de la contaminación con plomo (Sanneh, 2018). En este caso particular, el sistema *contaminación con plomo* tiene como partes interrelacionadas: la química verde, para la sustitución de compuestos contaminantes por otros no dañinos (Zimmerman *et al.*, 2020), la remediación del daño ya realizado y los desafíos del desarrollo sustentable de las Naciones Unidas (Blatti, 2017). También en el caso del plomo, en el que el problema puede estar relacionado con situaciones de exclusión social, se requiere de la consideración de estas comunidades como parte del entramado, que completan el sistema en estudio (Blatti *et al.*, 2019).

5.2.4. APRENDIZAJE BASADO EN PROBLEMAS (PROBLEM-BASED LEARNING)

Se trata de un proceso de indagación para dar respuesta a los aspectos fundamentales de un problema complejo real. El método se basa en la participación activa del estudiante en su propio proceso de aprendizaje, centrado en la capacidad de indagación del estudiante (Laur, 2013). Es una de las metodologías propuestas para preparar a los estudiantes en temas de ecotoxicología (Lopes *et al.*, 2020; Perrault y Albert, 2018).

5.2.5. INTEGRACIÓN INTERDISCIPLINARIA

Esta nueva propuesta metodológica está en la base del enfoque sobre el tema en el que hemos trabajado en este libro. La temática del plomo incluye diferentes áreas que pueden ser incorporadas usando al plomo como disparador.

5.3. Divulgación

Uno de los aspectos fundamentales para el combate del plomo es eliminar la desinformación. Es necesario que la población reconozca la existencia del plomo y aprenda a convivir con él. Y uno de los mecanismos para vencer a la desinformación es educar a los jóvenes para que sean estos quienes informen a los adultos en el hogar. Para ello, se puede recurrir a cualquiera de las metodologías detalladas en la sección 5.2, que buscan generar entusiasmo y curiosidad entre los estudiantes, a la vez que enfrentarlos a la problemática en campo.

Otro de los mecanismos para divulgar la temática del plomo es la realización de cursos para adultos, en dos niveles: cursos para formadores de docentes y cursos para la población en general. La Udelar cumple aquí un papel fundamental, ayudando a la comprensión de los problemas contemporáneos de la sociedad (Méndez, 2019).

El curso de Educación Permanente Valoración de la Presencia de Plomo en el Ambiente Laboral y en el Hogar mediante Técnicas Descentralizadas, que llevamos a cabo en el año 2019 en los departamentos de Colonia y Montevideo (figura 23), constituyó un primer ejercicio de divulgación sistemática, que continuó en 2020 con un curso dictado por plataforma virtual (debido a la pandemia de covid-19) con los alumnos de tercer año de la enseñanza secundaria del Instituto Crandon, experiencia que se repitió en el año 2021.

Figura 23. Alumnos del curso de Educación Permanente dictado en el Centro Regional de Profesores en Colonia, el 2 de octubre de 2019. Fotografía tomada por uno de los autores, E. Méndez



El programa aprobado del curso incluyó el siguiente temario:

1. la contaminación con plomo;
2. consecuencias sociales;
3. la legislación vigente;
4. acciones preventivas;
5. la valoración en el área de trabajo;
6. la valoración en el hogar;
7. acciones de remediación.

Se incluyó también una actividad práctica, consistente en la búsqueda de posibles lugares u objetos contaminados con plomo y su verificación mediante la técnica del trapo húmedo.

En el caso del curso dictado a los estudiantes liceales, debido a que no se pudo hacer una práctica presencial, se les mostró el análisis de manera virtual y se enfocó el curso en las fuentes de plomo en el hogar y las formas de prevención, comparándolas con las llevadas a cabo para prevenir el contagio por el covid-19 (véase sección 5.4).

A través de la OMS, se promueve la semana del plomo a nivel mundial, que en el año 2019 fue organizada por el Departamento de Toxicología de la Facultad de Medicina (figura 24).

Figura 24. Promoción de la jornada enmarcada en el programa internacional Semana Internacional de la Prevención de la Intoxicación por Plomo, de la OMS, focalizada en el plomo en pinturas

PLOMO EN PINTURAS
PROBLEMA GLOBAL, SOLUCIONES LOCALES

Jueves 24 de octubre de 2019
Agenda

- 10.30-10.45. «El plomo como contaminante global-», Amalia Laborde, Departamento de Toxicología, Facultad de Medicina, Universidad de la República.
- 10.45-11.15. «Exposición infantil a pinturas antiguas con plomo en su domicilio», María José Mol, Unidad Pediátrica Ambiental, Departamento de Toxicología, Facultad de Medicina, RAP-ASSE.
- 11.15-11.45. «Análisis de plomo en pinturas. Nuevas tecnologías para la identificación de la exposición», Eduardo Méndez, Laboratorio de Biomateriales, Instituto de Química Biológica, Facultad de Ciencias, Universidad de la República.
- 11.45-12.15. «Plomo en pinturas. A 10 años de la legislación preventiva en Uruguay», Judith Torres, Dinama-INVOTMA.

Organiza: Departamento de Toxicología, Facultad de Medicina.
Lugar: Hospital de Clínicas, piso 7, anfiteatro.

Estas reuniones permitieron el intercambio entre los diferentes organismos que trabajan en Uruguay en los temas del plomo: la Udelar, a través de sus facultades de Ciencias, Medicina y Química, la Intendencia de Montevideo, y el Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (actualmente separado en dos: el Ministerio de Vivienda y Ordenamiento Territorial y el Ministerio de Ambiente).

Dentro de las metas de difusión de la temática, que formaron parte de un proyecto de inclusión social financiado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica (Udelar), en 2021 se llevó a cabo un curso de forma virtual para educadores de Medellín (Colombia), organizado por la Foundation of Researchers in Science and Technology of Materials (Foristom) (figura 26). El curso se denominó Contaminación con Plomo: Eje Temático para la Integración Disciplinar en Enseñanza Secundaria y desarrolló nuestra propuesta de metodología de integración interdisciplinaria (véase la sección 5.2.5).

En 2022, con la financiación de la Administración Nacional de Educación Pública (ANEP) se dictó el curso El estudio de problemas ambientales como metodología integradora del currículum El caso de la contaminación con plomo, como parte del un proyecto aprobado por el Programa de Apoyo al Desarrollo de la Investigación en Educación (Pradine) del Consejo de Formación en Educación (CFE). El curso incluyó participantes de nóveles docentes de química de todo el país.

Figura 25. Póster de difusión del curso Contaminación con Plomo: Eje Temático para la Integración Disciplinar en Enseñanza Secundaria, llevado a cabo en forma virtual en abril de 2021 para educadores de Colombia, con la organización de la fundación Foristom

FORISTOM Foundation te invita a la conferencia:

CONTAMINACIÓN CON PLOMO

Eje temático para la integración disciplinar en enseñanza secundaria

Conferencista:
Profesor Eduardo Méndez
Universidad de la República, Montevideo, Uruguay

Dirigido a: Estudiantes de 11° y profesores del Colegio Integrado Madre de la Esperanza

Sabana de Torres, Santander, Colombia.

7 abril 2021
Transmisión virtual en vivo
9:00 am (UTC/GMT -5)

Foristom Foundation

The poster features several small inset images: a map of South America with a red arrow pointing to Colombia, a world map with a red dot in Colombia, and a diagram of a school building.

CONCLUSIONES GENERALES

El plomo está entre nosotros y no lo podemos evitar. Las actividades humanas desarrolladas a lo largo de cientos de años han sacado al plomo de los sedimentos y nos han expuesto a él sin tener mecanismos de defensa que nos protegieran. No solo lo hemos sacado de sus escondrijos, sino que también lo hemos diseminado por todo el planeta, y no existe lugar en el que el plomo esté ausente.

No nos queda otra alternativa que aprender a convivir con él. Para ello, es necesario conocer sus fuentes, reconocer los síntomas y tomar acciones preventivas para evitar la contaminación, que no están tan lejanas de las que tomamos a partir de la pandemia de covid-19.

El conocimiento del problema y la educación desde la infancia nos permitirán convivir con el plomo evitando las contaminaciones agudas y mitigando las crónicas. La educación en las escuelas es tan importante como la educación en el seno familiar. Lo interesante es cómo, en este caso, son los niños los que pueden educar y enseñar a los adultos utilizando su propio idioma y ayudando a que el tema se internalice en nuestros comportamientos.



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- Al-Saleh, I. (1998). Sources of lead in Saudi Arabia: a review. *Journal of Environmental Pathology, Toxicology and Oncology*, 17, International Society for Environmental Toxicology and Cancer, 17-35.
- Anderson, D. G., y Clark, J. L. (1974). Neighborhood screening in communities throughout the nation for children with elevated blood lead levels. *Environmental Health Perspectives*, (7), 3-6. doi: 10.1289/ehp.7-1475126
- Ansin, A., et al. (2019). Lead analysis in paints for high impact control in homes. *Analytical Methods*, 11, 4254-4259. doi: 10.1039/c9ay01262a
- Ashley, K., et al. (1998). Field investigation of on-site techniques for the measurement of lead in paint films. *Field Analytical Chemistry and Technology*, 2(1), 39-50. doi: 10.1002/(sici)1520-6521(1998)2:1<39::aid-fact5>3.0.co;2-9
- Ashley, K. (2010). Field-portable methods for monitoring occupational exposures to metals. *Journal of Chemical Health and Safety*, 17(3), 22-28. doi: 10.1016/j.jchas.2009.07.002
- Wise, T., y Esswein, E. (2011). Evaluation of a handwipe disclosing method for lead. *Journal of ASTM International*, 8(4), 1-7. doi: 10.1520/JAI103390
- Ayalew, E.; Janssens, K., y De Wael, K. (2016). Unraveling the reactivity of minium toward bicarbonate and the role of lead oxides therein. *Analytical Chemistry*, 88(3), 1564-1569. doi: 10.1021/acs.analchem.5b02503
- Aze, S., et al. (2007). Red lead darkening in wall paintings: Natural ageing of experimental wall paintings versus artificial ageing tests. *European Journal of Mineralogy*, 19(6), 883-890. doi: 10.1127/0935-1221/2007/0019-1771
- Bae, S.-Y., et al. (2019). Hazard potential of perovskite solar cell technology for potential implementation of «safe-by-design» approach. *Scientific Reports*, 9(1), 4242. doi: 10.1038/s41598-018-37229-8

- Baig, J. A., *et al.* (2019). Evaluation of arsenic, cadmium, nickel and lead in common spices in Pakistan. *Biological Trace Element Research*, 187(2), 586-595. doi: 10.1007/s12011-018-1400-4
- Battelle, S. B. a. D. R. (2012). *3M LeadCheckSwabs Qualitative Spot Test Kit for Lead in Paint*.
- Beck, L., *et al.* (2018). Absolute dating of lead carbonates in ancient cosmetics by radiocarbon. *Communications Chemistry*, 1(1), 34. doi: 10.1038/s42004-018-0034-y
- Berke, H. (2007). The invention of blue and purple pigments in ancient times. *Chemical Society Review*, 36(1), 15-30. doi: 10.1039/B606268G
- Bird, B. W., *et al.* (2019). Pre-columbian lead pollution from native american galena processing and land use in the midcontinental United States. *Geology*, 47(12), 1193-1197. doi: 10.1130/G46673.1
- Blatti, J. L. (2017). Colorful and creative chemistry: Making simple sustainable paints with natural pigments and binders. *Journal of Chemical Education*, 94(2), 211-215. doi: 10.1021/acs.jchemed.6b00591
- *et al.* (2019). Systems thinking in science education and outreach toward a sustainable future. *Journal of Chemical Education*, 96(12), 2852-2862. doi: 10.1021/acs.jchemed.9b00318
- Blumberg, W. E., *et al.* (1977). Zinc protoporphyrin level in blood determined by a portable hematofluorometer: A screening device for lead poisoning. *The Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 89(4), 712-723.
- Board, E. (2016). The racism at the heart of Flint's crisis. *The New York Times*. Tomado de <<http://www.nytimes.com/2016/03/25/opinion/the-racism-at-the-heart-of-flints-crisis.html>>.
- Bourtembourg, R. (2013). Was Uranus observed by Hipparchus? *Journal for the History of Astronomy*, 44(4), 377-387. doi: 10.1177/002182861304400401
- Brill, R. H.; Martin, J. H., y Glass, I. C. o. G. T. T. A. o. (1991). *Scientific Research in Early Chinese Glass: Proceedings of the Archaeometry of Glass Sessions of the 1984 International Symposium on Glass, Beijing, September 7, 1984, with Supplementary Papers*. Corning Museum of Glass.
- Burger, M., y Pose Román, D. (2010). *Plomo, salud y ambiente. Experiencia en Uruguay*. Udelar, OPS, OMS.
- Caffo, A. L., y Lubin, A. H. (1976). The use of erythrocyte protoporphyrin (EP) and lead in blood in screening a pediatric population for undue lead exposure. *Clinical Chemistry*, 22(7).
- Caldwell, R. (2003). *Hesiod Theogony*. Focus Classical Library.
- Campbell, C., *et al.* (2016). A case study of environmental injustice: The failure in Flint. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(10). doi: 10.3390/ijerph13100951

- Clark, R. J. H., *et al.* (1995). Synthesis, structural characterisation and Raman spectroscopy of the inorganic pigments lead tin yellow types I and II and lead antimonate yellow: Their identification on medieval paintings and manuscripts. *Journal of the Chemical Society, Dalton Transactions*, (16), 2577-2582. doi: 10.1039/DT9950002577
- Coccatto, A.; Moens, L., y Vandenaabeele, P. (2017). On the stability of mediaeval inorganic pigments: A literature review of the effect of climate, material selection, biological activity, analysis and conservation treatments. *Heritage Science*, 5(1). doi: 10.1186/s40494-017-0125-6
- National Lead Company (1923a). *The Dutch Boy's Lead Party. A Paint Book for Girls and Boys*. Tomado de <<https://www.youtube.com/watch?v=uSwPE4xnk8>>.
- (1923b). *The Dutch Boy's Lead Party. A Paint Book for Girls and Boys*. National Lead Company.
- Cooke, R. E., *et al.* (1974). Comparative study of a micro scale test for lead in blood, for use in mass screening programs. *Clinical Chemistry*, 20(5), 582-585. doi: 10.1093/clinchem/20.5.582
- Council, N. R. (2005) (ed.). *Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis*. The National Academies Press.
- Cousillas, A. Z., *et al.* (1998). Relevamiento de plumbemias en un complejo habitacional de Montevideo (Uruguay). *Acta Farmacéutica Bonaerense*, 17(4), 291-296.
- *et al.* (2012). Impacts of multidisciplinary actions on environmental lead exposure in Uruguay. *Environmental Geochemistry and Health*, 34(2), 207-211. doi: 10.1007/s10653-011-9426-y
- Cowell, W., *et al.* (2017). Ground turmeric as a source of lead exposure in the United States. *Public Health Reports*, 132(3), 289-293. doi: 10.1177/0033354917700109
- Craddock, P. T., y LANG, J. (2003). *Mining and Metal Production Through the Ages*. British Museum Press.
- Curley, A. N., *et al.* (2020). Isotopic composition of lead white pigments on qeros: Implications for the chronology and production of Andean ritual drinking vessels during the colonial era. *Heritage Science*, 8(1), 72. doi: 10.1186/s40494-020-00408-w
- Christiansen, T., *et al.* (2020). Insights into the composition of ancient Egyptian red and black inks on papyri achieved by synchrotron-based microanalyses. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(45), 27825. doi: 10.1073/pnas.2004534117
- Daines, T. L., y Morse, K. W. (1976). The chemistry involved in the preparation of a paint pigment. An experiment for the freshman laboratory. *Journal of Chemical Education*, 53(2), 117. doi: 10.1021/ed053p117
- Davey, M. (2017). For Flint, an 1882 play about bad water is «Exactly what we're living». *The New York Times*. Tomado de <<https://www.nytimes.com/2017/06/11/us/flint-water-crisis-theater-ibsen.html>>.

- Davidow, B.; Slavin, G., y Piomelli, S. (1976). Measurement of free erythrocyte protoporphyrin in blood collected on filter paper as a screening test to detect lead poisoning in children. *Annals of Clinical and Laboratory Science*, 6(3), 209-213.
- Delile, H., *et al.* (2017). Rome's urban history inferred from Pb-contaminated waters trapped in its ancient harbor basins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201706334. doi: 10.1073/pnas.1706334114
- Dennis, B. (2017). Scott Pruitt, longtime adversary of EPA, confirmed to lead the agency. *The Washington Post*. Tomado de <<https://www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2017/02/17/scott-pruitt-long-time-adversary-of-epa-confirmed-to-lead-the-agency/>>.
- Denworth, L. (2008). *Toxic Truth: A Scientist, a Doctor, and the Battle Over Lead*. Beacon Press.
- Desai, G., *et al.* (2021). Examining links between diet and lead exposure in young children: 2009 to 2014 National Health and Nutrition Examination Survey. *Academy Pediatrics*, 21(3), 471-479. doi: 10.1016/j.acap.2020.06.009
- Des Planches, L. T. (1839). *Traité des maladies de plomb ou saturnines*. Ferra.
- Digital Public Library of America (1913). *The Dutch-Boy Painter*.
- Doménech-Carbó, M. T., *et al.* (2020). Funerary colors in pre-classical Maya culture: The red pigment in the 19th tomb of Rio Azul (Peten, Guatemala). *Heritage Science*, 8(1), 47. doi: 10.1186/s40494-020-00386-z
- Dongre, N. N., *et al.* (2011). Biochemical effects of lead exposure on systolic y diastolic blood pressure, heme biosynthesis and hematological parameters in automobile workers of north karnataka (India). *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 26, 400-406. doi: 10.1007/s12291-011-0159-6
- Eligon, J. A. (2016). Question of environmental racism in Flint. *The New York Times*. Tomado de <<http://www.nytimes.com/2016/01/22/us/a-question-of-environmental-racism-in-flint.html>>.
- EPA (2008). *Qualitative Spot Test Kits for Lead in Paint*.
- Erasmus, S. W., *et al.* (2020). Real or fake yellow in the vibrant colour craze: Rapid detection of lead chromate in turmeric. *Food Control*. doi: 10.1016/j.foodcont.2020.107714
- Felton, J. S. (1997). The heritage of Bernardino Ramazzini. *Occupational Medicine*, 47(3), 167-179. doi: 10.1093/occmed/47.3.167
- Feller, R. L. (1986). *Artists' Pigments: A Handbook of Their History and Characteristics*. Cambridge University Press.
- Gilfillan, S. C. (1965). Lead poisoning and the fall of Rome. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 7, 53-60. ISSN: 0096-1736.
- Gourlaouen, C., y Parisel, O. (2007). Is an electronic shield at the molecular origin of lead poisoning? a computational modeling experiment. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(4), 553-556. doi: 10.1002/anie.200603037
- Gowland, W. (2011). XXI. The early metallurgy of silver and lead: Part I. lead. *Archaeologia*, 57(2), 359-422. doi: 10.1017/S0261340900014211

- Haynes, W. M. (2011). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. CRC Press.
- Hernberg, S. (2000). Lead poisoning in a historical perspective. *American Journal of Industrial Medicine*, 38(3), 244-254. doi: 10.1002/1097-0274(200009)38:3<244::AID-AJIM3>3.0.CO;2-F
- Hong, S., *et al.* (1994). Greenland ice evidence of hemispheric lead pollution two millennia ago by Greek and Roman civilizations. *Science*, 265(5180), 1841. doi: 10.1126/science.265.5180.1841
- Huang, S., *et al.* (2016). Structural basis for the selective Pb(II) recognition of metalloregulatory protein PbrR691. *Inorganic Chemistry*, 55(24), 12516-12519. doi: 10.1021/acs.inorgchem.6b02397
- Hynes, M. J., y Jonson, B. (1997). Lead, glass and the environment. *Chemical Society Reviews*, 26(2), 133-146. doi: 10.1039/CS9972600133
- INE (2011). *Hogares particulares, por categoría de vivienda, según área y tenencia de la vivienda*. Instituto Nacional de Estadística.
- Inwood, J. F. J. (2018). «It is the innocence which constitutes the crime»: Political geographies of white supremacy, the construction of white innocence, and the Flint water crisis. *Geography Compass*, 12(3), e12361. doi: <https://doi.org/10.1111/gec3.12361>
- Jacobson, P. D., *et al.* (2020). The role of the legal system in the Flint water crisis. *Milbank Q*, 98(2), 554-580. doi: 10.1111/1468-0009.12457
- Jaffe, E. K., *et al.* (2001) The molecular mechanism of lead inhibition of human porphobilinogen synthase. *Journal of Biological Chemistry*, 0021-9258.
- Janson, J. (2020). *ESSENTIAL VERMEER 3.0*. Tomado de: <http://www.essentialvermeer.com/2001-2022> Jonathan Janson |.
- Kesner, L., y Eyring, E. M. (1999). Service-learning general chemistry: Lead paint analyses. *Journal of Chemical Education*, 76(7), 920. doi: 10.1021/ed076p920
- Kim, H.-C., *et al.* (2015). Evaluation and management of lead exposure. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 27, 30. doi: 10.1186/s40557-015-0085-9
- Kordas, K. (2017). The «lead diet»: Can dietary approaches prevent or treat lead exposure? *The Journal of Pediatrics*, 185, 224-231.e221. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2017.01.069>
- *et al.* (2018). Nutritional status and diet as predictors of children's lead concentrations in blood and urine. *Environment International*, 111, 43-51. doi: 10.1016/j.envint.2017.11.013
- Kuneva, T., *et al.* (2015). Early diagnosis of chronic saturnism. *Oxidation Communications*, 38(2), 734-741.
- Kurzweil, P. (2010). Gaston Planté and his invention of the lead-acid battery. The genesis of the first practical rechargeable battery. *Journal of Power Sources*, 195(14), 4424-4434. doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.12.126
- Laborde, A., *et al.* (2006). Estudio epidemiológico de una población expuesta laboralmente a plomo. *Revista Médica del Uruguay*, 22, 287-292.

- Lanzirotti, A., *et al.* (2014). Assessing heavy metal exposure in Renaissance Europe using synchrotron microbeam techniques. *Journal of Archaeological Science*, 52, 204-217. doi: 10.1016/j.jas.2014.08.019
- Larsen, E. (2007). *Infancia entre soldaditos y otros chiches. Los sobrevivientes del plomo.*
- Laur, D. (2013). *Authentic Learning Experiences: A Real-World Approach to Project-Based Learning.* Taylor y Francis.
- Lessler, M. A. (1988). Lead and lead poisoning from antiquity to modern times. *Ohio Journal of Science*, 88, 77-84.
- Levin, R., *et al.* (2021). The urban lead (Pb) burden in humans, animals and the natural environment. *Environmental Research*, 193, 110377. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110377>
- Leygraf, C., *et al.* (2016). *Atmospheric Corrosion*, 2.^a ed. Atmospheric Corrosion.
- Lisi, F.; Peterson, J. R., y Gooding, J. J. (2020). The application of personal glucose meters as universal point-of-care diagnostic tools. *Biosensors and Bioelectronics*, 148, 111835. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2019.111835>
- Lopes, R. M., *et al.* (2020). Principles of problem-based learning for training and professional practice in ecotoxicology. *Science of the Total Environment*, 702. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134809
- Mañay, N., *et al.* (1993). Niveles de plumbemia en trabajadores expuestos al plomo en Uruguay y su relación con el tipo de actividad. *Acta Farmacéutica Bonaerense*, 12, 145-148.
- Mañay, N.; Pereira, L., y Cousillas, Z. (1999). Lead contamination in Uruguay. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 159, 25-39.
- Mañay, N.; Alonzo, C., y Dol, I. (2003). Lead exposure in the town of La Teja, Montevideo, Uruguay. *Salud Pública de México*, 45(2), S268-S275.
- Mañay, N., *et al.* (2008). Lead contamination in Uruguay: the La Teja neighborhood case. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, 195, 93-115. doi: 10.1007/978-0-387-77030-7_4.
- Mao, J.S., Dong J. y Graedel T.E. (2008) *The multilevel cycle of anthropogenic lead: II. Results and discussion.* Resources, Conservation and Recycling, 52: 1050-1057
- Marcus, M., *et al.* (1975). Micro scale blood lead determinations in screening: evaluation of factors affecting results. *Clinical Chemistry*, 21(4), 533-536. doi: 10.1093/clinchem/21.4.533
- Markowitz, G., y Rosner, D. (2000). «Cater to the children»: the role of the lead industry in a public health tragedy, 1900-1955. *American Journal of Public Health*, 90(1), 36-46. doi: 10.2105/ajph.90.1.36
- Martínez-Cortizas, A., *et al.* (1997). Four thousand years of atmospheric Pb, Cd and Zn deposition recorded by the ombrotrophic peat bog of Penido Vello (Northwestern Spain). *Water, Air, and Soil Pollution*, 100(3-4), 387-403. doi: 10.1023/A:1018312223189

- Matlin, S. A., *et al.* (2016). One-world chemistry and systems thinking. *Nature Chemistry*, 8(5), 393-398. doi: 10.1038/nchem.2498
- McCombie, H., y Saunders, B. C. (1947). Toxic organo-lead compounds. *Nature*, 159(4041), 491-494. doi: 10.1038/159491a0
- McCusker, J. (1977). Evaluation of a screening program for lead poisoning in children based on blood lead levels. *American Journal of Epidemiology*, 106(3), 234.
- Mehkeri, K. A.; Romanowski, M., y Smalkbone, B. (1976). Use of a filter disc micro-sampling atomic absorption method for blood lead level screening. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 37(9), 541-545. doi: 10.1080/0002889768507512
- Méndez, E. (2019). El plomo y la Udelar. *Semanario Brecha*, 27 de junio, 1.
- Mielke, H. W. (1999). Lead in the inner cities. *American Scientist*, 87(1), 62-73. doi: 10.1511/1999.1.62
- Misner, J.; Boats, J., y Benvenuto, M. A. (2007). Chemical composition of song dynasty, Chinese, copper-based coins via energy dispersive X-ray fluorescence. *Archaeological Chemistry*, 968, American Chemical Society, 231-245.
- Mitchell, D. G.; Aldous, K. M., y Ryan, F. J. (1974). Mass screening for lead poisoning. Capillary blood sampling and automated Delves cup atomic absorption analysis. *New York State Journal of Medicine*, 74(9), 1599-1603.
- Miyasaka, T., *et al.* (2020). Perovskite solar cells: can we go organic-free, lead-free, and dopant-free? *Advanced Energy Materials*, 10(13), 1902500. doi: <https://doi.org/10.1002/aenm.201902500>
- Monchy, S., Benotmane, M.A., Janssen, P., Vallaey, T., Taghavi, S., can der Lelie, D. y Mergeay, M. (2007). Plasmids pMOL28 and pMOL30 of *Cupriavidus metallidurans* are specialized in the maximal viable response to heavy metals. *Journal of Bacteriology*, 189, 7417-7425
- Monico, L., *et al.* (2011). Degradation process of lead chromate in paintings by Vincent van Gogh studied by means of synchrotron X-ray spectromicroscopy and related methods. 1. Artificially aged model samples. *Analytical Chemistry*, 83, 1214-1223. doi: 10.1021/ac102424h
- Montes-Santiago, J. (2013). The lead-poisoned genius: Saturnism in famous artists across five centuries. *Progress in Brain Research*, 203, 223-240. doi: 10.1016/B978-0-444-62730-8.00009-8
- Moorey, P. R. S., y Moorey, F. B. A. V. G. S. R. F. P. R. S. (1994). *Ancient Mesopotamian Materials and Industries: The Archaeological Evidence*. Clarendon Press.
- Murphy, T., y Lepow, M. L. (1971). Comparison of delta-aminolevulinic acid levels in urine and blood lead levels for screening children for lead poisoning. *Connecticut Medicine*, 35(8), 488-492.
- Needleman, H. L. (1998). Clair Patterson and Robert Kehoe: two views of lead toxicity. *Environmental Research*, 78(2), 79-85. doi: <https://doi.org/10.1006/enrs.1997.3807>
- (2004). Lead poisoning. *Annual Review of Medicine*, 55, 209-222. doi: 10.1146/annurev.med.55.091902.103653

- Niosh (2003). *Lead in Dust Wipes: Method 9105*. National Institute for Occupational Safety and Health.
- Nriagu, J. O. (1983a). *Lead and Lead Poisoning in Antiquity*. John Wiley y Sons.
- (1983b). Saturnine gout among Roman aristocrats. Did lead poisoning contribute to the fall of the Empire? *The New England Journal of Medicine*, 308(11), 660-663. doi: 10.1056/nejm198303173081123
- O'Connor, D., et al. (2018). Lead-based paint remains a major public health concern: A critical review of global production, trade, use, exposure, health risk, and implications. *Environmental International*, 121, 85-101. doi: 10.1016/j.envint.2018.08.052
- Obeng-Gyasi, E. (2019). Sources of lead exposure in various countries. *Reviews on Environmental Health*, 34(1), 25-34. doi: 10.1515/reveh-2018-0037
- Osman, A. G., et al. (2019). Overview of analytical tools for the identification of adulterants in commonly traded herbs and spices. *Journal of AOAC International*, 102(2), 376-385. doi: 10.5740/jaoacint.18-0389
- Otero, V., et al. (2012). Chrome yellow in nineteenth century art: Historic reconstructions of an artists' pigment. *RSC Advances*, 2, 1798-1805. doi: 10.1039/c1ra00614b
- Parlamento de Estados Unidos (1971). Lead-Based Paint Poisoning Prevention Act. Public Law 91-695.
- Paskin, S. (1992). Theda Bara. *Jewish Quarterly*, 39(3), 16-18. doi: 10.1080/0449010X.1992.10705867
- Penton, Z., y Bissell, G. (1978). Some factors affecting the utility of bovine blood as a control material in lead-screening programs. *Clinical Chemistry*, 24(3), 504-506. doi: 10.1093/clinchem/24.3.504
- Perrault, E. K., y Albert, C. A. (2018). Utilizing project-based learning to increase sustainability attitudes among students. *Applied Environmental Education and Communication*, 17(2), 96-105. doi: 10.1080/1533015X.2017.1366882
- Pizzini, N. (2012). Revising Walter C. McCrone's dates for pigment use. *The Microscope*, 60, 29-36.
- Poder Ejecutivo (2003). Decreto 373/003. Regulación del Manejo y Disposición de Baterías de Plomo y Ácido Usadas o a Ser Desechadas.
- (2011). Decreto 069/011. Reglamentación sobre las Limitaciones al Contenido de Plomo en Pinturas y Barnices.
- Poder Legislativo (1934). Ley 9196. Caja de Jubilaciones de la Industria, Comercio y Servicios Públicos. Creación, 8-9.
- (2004a). Ley 17.774. Examen de Dosificación de Plombemia. Inclusión en el Carné de Salud a los Trabajadores que se Determinan.
- (2004b). Ley 17.775. Declaración de Interés General. Regulación de la Contaminación por Plomo.
- Pollard, A. M. (1986). Metals used in southeast Asian coinage, first to seventeenth centuries, A. D. Presentado en Proceedings of the 24th International Archaeometry Symposium.

- Radosevic, Z., *et al.* (1961). The kidney in lead poisoning. *British Journal of Industrial Medicine*, 18, 222-230. doi: 10.1136/oem.18.3.222
- Raffaini, P. T. (2018). Are girls made of rags and boys of lead? Material culture and literature. *Secuencia*, 177-187.
- Rasmussen, K. L., *et al.* (2015). Comparison of mercury and lead levels in the bones of rural and urban populations in Southern Denmark and Northern Germany during the Middle Ages. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 3, 358-370. doi: 10.1016/j.jasrep.2015.06.021
- Renfrew, D. (2018). *Life without lead. Contamination, crisis, and hope in Uruguay*. University of California Press.
- Resongles, E., *et al.* (2021). Strong evidence for the continued contribution of lead deposited during the 20th century to the atmospheric environment in London of today. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(26), e2102791118. doi: 10.1073/pnas.2102791118
- Riva, M. A., *et al.* (2012). Lead poisoning: historical aspects of a paradigmatic «occupational and environmental disease». *Safety and Health at Work*, 3(1), 11-16. doi: 10.5491/SHAW.2012.3.1.11
- Rosner, D. y Markowitz, G. (2005) *Standing up to the lead industry: an interview with Herbert Needleman*. Public Health Reports 120: 330-337.
- Rossi, E.; Taketani, S., y García-Webb, P. (1993). Lead and the terminal mitochondrial enzymes of haem biosynthesis. *Biomedical Chromatography*, 7(1), 1-6. doi: 10.1002/bmc.1130070102
- Roy, S., y Edwards, M. A. (2019). Preventing another lead (Pb) in drinking water crisis: Lessons from the Washington D. C. and Flint MI contamination events. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 7, 34-44. doi: 10.1016/j.coesh.2018.10.002
- Sanneh, E. S. (2018). *Systems Thinking for Sustainable Development: Climate Change and the Environment*. Springer International Publishing.
- Sanz, J. C., y Gallego, R. (2001). *Diccionario akal del color*. Ediciones Akal.
- Scott, D. A., y Meyers, P. (1994). *Archaeometry of Pre-Columbian Sites and Artifacts: Proceedings of a Symposium organized by the UCLA Institute of Archaeology and the Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, March 23-27, 1992*. Getty Conservation Institute.
- Schütz, A., *et al.* (1997). Blood lead in Uruguayan children and possible sources of exposure. *Environmental Research*, 74(1), 17-23. doi: 10.1006/enrs.1997.3742
- Seaton, A. (2014). Saturnism: An old story of poisoning. *QJM: An International Journal of Medicine*, 107(6), 501-502. doi: 10.1093/qjmed/hcu070
- Selwin, L. (2005). Health and safety concerns relating to lead and lead compounds in conservation. *Journal of the Canadian Association for Conservation*, 30, 18-37.
- Seyferth, D. (2003). The rise and fall of tetraethyllead. 2. *Organometallics*, 22(25), 5154-5178. doi: 10.1021/om030621b

- Shackelford, J. F., y Doremus, R. H. (2008). *Ceramic and Glass Materials: Structure, Properties and Processing*. Springer US.
- Singh, N., *et al.* (2018). Biochemical and molecular bases of lead-induced toxicity in mammalian systems and possible mitigations. *Chemical Research and Toxicology*, 31(10), 1009-1021. doi: 10.1021/acs.chemrestox.8b00193
- Smith, C. A. (1983). A review of green pigments for paints and printing inks. *Pigment & Resin Technology*, 12(6), 16-20. doi: 10.1108/eb041918
- Smith, K. E., *et al.* (2020). Honey maps the Pb fallout from the 2019 fire at Notre-Dame cathedral, Paris: A geochemical perspective. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(10), 753-759. doi: 10.1021/acs.estlett.0c00485
- Smith, P. H. (2016). *The Business of Alchemy: Science and Culture in the Holy Roman Empire*. Princeton University Press.
- Sowers, T. D., *et al.* (2021). High lead bioavailability of indoor dust contaminated with paint lead species. *Environmental Science & Technology*, 55(1), 402-411. doi: 10.1021/acs.est.0c06908
- Tait, H. (2004). *Five Thousand Years of Glass*. University of Pennsylvania Press.
- Tapsoba, I., *et al.* (2010). Finding out Egyptian gods' secret using analytical chemistry: Biomedical properties of Egyptian black makeup revealed by amperometry at single cells. *Analytical Chemistry*, 82(2), 457-460. doi: 10.1021/ac902348g
- Tétreault, J. (2003). *Airborne Pollutants in Museums, Galleries, and Archives: Risk Assessment, Control Strategies, and Preservation Management*. Ottawa.
- Tite, M. S., *et al.* (1998). Lead glazes in antiquity-methods of production and reasons for use. *Archaeometry*, 40(2), 241-260. doi: 10.1111/j.1475-4754.1998.tb00836.x
- Torrice, M. (2016). How lead ended up in Flint's water. *C&EN Global Enterprise*, 94(7), 26-29. doi: 10.1021/cen-09407-scitech1
- UNEP (2013). *Lead in Enamel Decorative Paints. National Paint Testing Results: A Nine Country Study*. UNE Programme Ed.
- Van Peteghem, C.; Heyndrickx, A., y Vereecke, R. (1979). Diagnostic value of free erythrocyte porphyrins and blood lead as a screening test for lead exposure. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 31(1), 551-552. doi: 10.1111/j.2042-7158.1979.tb13582.x
- Vernatti, P. (1677). A relation of the making of Ceruss, by Sir Philiperto Vernatti. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 12(137), 935-936. doi: 10.1098/rstl.1677.0036
- Vinceti, S., y Gruppioni, G. (2010). *L'enigma Caravaggio: ipotesi scientifiche sulla morte del pittore*. Armando.
- Vose, R. H. (1980). *Glass*. Collins.
- Wang, B., *et al.* (2020). Heavy metals in face paints: Assessment of the health risks to Chinese opera actors. *Science of the Total Environment*, 724. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138163

- Wani, A. L.; Ara, A., y Usmani, J. A. (2015). Lead toxicity: a review. *Interdisciplinary Toxicology*, 8, 55-64. doi: 10.1515/intox-2015-0009
- Warren, C. (2001). *Brush with Death: A Social History of Lead Poisoning*. Johns Hopkins University Press.
- Wasson, D. L. (2015). *Saturn*. *Ancient History Encyclopedia*. Tomado de <<https://www.ancient.eu/Saturn/>>.
- Wedepohl, K. H., y Baumann, A. (1997). Isotope composition of medieval lead glasses reflecting early silver production in Central Europe. *Mineralium Deposita*, 32(3), 292-295. doi: 10.1007/s001260050094
- Weidenhamer, J. D. (2009). Lead contamination of inexpensive seasonal and holiday products. *Science of the Total Environment*, 407(7), 2447-2450. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.11.031
- Welcomme, E., Walter, P., van Elslande E. y Tsoucaris G. (2006). Investigation of white pigments used as make-up during the Greco-Roman period. *Applied Physics A* 83, 551-556.
- Wiberg, E., *et al.* (2001). *Inorganic Chemistry*. Academic Press.
- Xiang, Y., y lu, Y. (2011). Using personal glucose meters and functional DNA sensors to quantify a variety of analytical targets. *Nature Chemistry*, 3(9), 697-703. doi: 10.1038/nchem.1092
- Zilberstein, G., *et al.* (2019). De re metallica. Johannes Kepler and alchemy. *Talanta*, 204, 82-88. doi: 10.1016/j.talanta.2019.05.094
- Zimmerman, J. B., *et al.* (2020). Designing for a green chemistry future. *Science*, 367(6476), 397-400. doi: 10.1126/science.aay3060

TN

ÁREA DE LAS TECNOLOGÍAS Y
CIENCIAS DE LA
NATURALEZA Y EL HABITAT

El presente libro resume nuestra experiencia en el curso homónimo, de Educación Permanente, dictado a lo largo del año 2019 y en diferentes formatos (incluido el virtual) entre 2020 y 2022. El plomo es un reconocido contaminante mundial, y, como consecuencia de las investigaciones de la Universidad de la República a fines de la década del noventa, se demostró su incidencia nociva en Uruguay. Luego de su eliminación total en los combustibles y su limitación en el contenido de las pinturas, resta su presencia en los hogares a través de objetos *vintage*, cañerías y pinturas antiguas. La inevitabilidad de la convivencia con el plomo va de la mano con la necesidad de concientización de la población. El curso de Educación Permanente y la edición del presente libro constituyen alternativas excelentes para cumplir con el propósito de la difusión.

La necesidad de divulgar la temática del plomo a una población amplia nos llevó a diseñar un curso que abarcara diferentes aspectos: desde la ecotoxicología, la química y la bioquímica hasta el uso del plomo a lo largo de diferentes civilizaciones, incluido el extendido en el arte. De esta manera, el contenido de este libro puede ser utilizado en forma parcial o total, dependiendo de la población objetivo y sus intereses.

El libro está organizado en varios capítulos: comienza con un *racconto* histórico, que nos permite entender por qué el plomo está tan presente en la vida cotidiana; luego se adentra en aspectos técnicos, y, finalmente, se enfoca en los pasos realizados, en los que se sigue trabajando para minimizar el impacto y convivir con el contaminante.

COEDITORES Y AUSPICIANTES DE LA PUBLICACIÓN



ISBN: 978-9974-0-1927-0



9 789974 001927 0