

Química DEL

PLOMO



**UEB**  
UNIVERSIDAD  
ESTATAL DE BOLIVAR

## Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AMBIENTE

*El rastro tóxico que la historia no puede borrar.*

**Franz Verdezoto Mendoza**

**Juan Gaibor Chávez**

**Isidro Bayas Morejón**

**Edgar Rivera Guzmán**

**ISBN: 978-9907-0-0503-5**



**2025**

# **QUÍMICA DEL PLOMO Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AMBIENTE**

---

**AUTORES:**

**FRANZ PATRICIO VERDEZOTO MENDOZA**

**JUAN ALBERTO GAIBOR CHÁVEZ**

**ISIDRO FAVIÁN BAYAS MOREJÓN**

**EDGAR FABIÁN RIVERA GUZMÁN**



Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR  
Universidad Estatal de Bolívar  
Riobamba – Ecuador  
Correo: publicaciones@grupobl.com  
<https://grupobl.com/libros-investig>  
REPOSITORIO



Verdezoto, F., Gaibor, J., Bayas, I., Rivera, E. (2025) Química del plomo y su impacto en la calidad del ambiente. Grupo Editorial BLR.

© Franz Patricio Verdezoto Mendoza  
Juan Alberto Gaibor Chávez  
Isidro Favián Bayas Morejón  
Edgar Fabián Rivera Guzmán

**ISBN: 978-9907-0-0503-5**

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

## **FILIACIONES DE LOS AUTORES**

Franz Patricio Verdezoto Mendoza

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: [fverdezoto@ueb.edu.ec](mailto:fverdezoto@ueb.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0049-005X>

Juan Alberto Gaibor Chávez

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: [jgaibor@ueb.edu.ec](mailto:jgaibor@ueb.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4516-7416>

Isidro Favián Bayas Morejón

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: [fbayas@ueb.edu.ec](mailto:fbayas@ueb.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2920-7155>

Edgar Fabián Rivera Guzmán

Universidad Estatal de Bolívar

Correo Electrónico: [edgar.rivera@ueb.edu.ec](mailto:edgar.rivera@ueb.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2612-4760>

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
INTRODUCCIÓN .....	ix
CAPÍTULO I.....	14
<b>1 CONTAMINACIÓN DEL PLOMO EN EL RECURSO HÍDRICO Y PANORAMA INTERNACIONAL.....</b>	<b>14</b>
1.1 Propiedades químicas y físicas del plomo.....	21
1.1.1 Propiedades físicas .....	21
1.1.2 Propiedades químicas .....	22
1.2 Comportamiento en el medio ambiente.....	23
1.3 Usos industriales del plomo .....	23
1.3.1 Industria minera y metalúrgica.....	24
1.3.2 Pinturas.....	24
1.3.3 Baterías.....	25
1.3.4 Combustibles .....	25

1.3.5	Plomería.....	25
1.4	Vías de liberación al ambiente .....	26
1.4.1	Fuentes industriales y domésticas .....	26
1.4.2	Desechos electrónicos .....	27
1.4.3	Minería artesanal e informal.....	28
1.5	Contaminación del Agua por Plomo .....	29
1.5.1	Mecanismos de incorporación al recurso hídrico.....	29
1.5.2	Niveles de plomo en cuerpos de agua .....	30
1.6	Métodos de detección y monitoreo .....	32
1.7	Impactos de la contaminación por plomo.....	33
1.7.1	Impactos en el ambiente .....	34
1.7.2	Impactos en la salud humana.....	35
1.7.3	Impactos socioeconómicos.....	36
1.7.4	Estrategias de Prevención y Mitigación .....	37
1.7.5	Tecnologías de tratamiento de aguas.....	38
1.7.6	Programas de concienciación y educación ambiental .....	39
1.7.7	Innovación y perspectivas futuras .....	39

<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>41</b>
<b>2 CONTAMINACIÓN DEL PLOMO EN LOS ALIMENTOS.....</b>	<b>41</b>
2.1 Fuentes de contaminación del plomo en los alimentos .....	43
2.2 Contaminación en cultivos .....	43
2.3 Procesamiento y manipulación de alimentos .....	43
2.4 Almacenamiento y transporte.....	44
2.5 Alimentos con mayor riesgo de contaminación por plomo...	45
2.5.1 Vegetales y frutas .....	45
2.5.2 Cereales y legumbres.....	46
2.5.3 Productos de origen animal .....	46
2.5.4 Pescados y mariscos .....	47
2.5.5 Bebidas y alimentos procesados.....	47
2.6 Efectos en la salud humana .....	51
2.7 Poblaciones vulnerables .....	51
2.7.1 Niños y lactantes .....	51
2.7.2 Mujeres embarazadas .....	52
2.7.3 Efectos a corto plazo .....	52

2.7.4	Efectos a largo plazo .....	53
2.8	Normativas y límites máximos permisibles en alimentos .....	54
2.9	Métodos de detección y monitoreo en alimentos .....	56
2.9.1	Métodos químicos .....	57
2.10	Sistemas de control en la cadena alimentaria .....	57
2.11	Programas de vigilancia alimentaria en salud pública .....	58
2.12	Estrategias de prevención y mitigación en alimentos .....	60
2.12.1	Buenas prácticas agrícolas (BPA) .....	60
2.12.2	Control en la industria alimentaria .....	60
2.12.3	Sustitución de materiales contaminantes en envases y utensilios .....	61
2.13	Educación y sensibilización del consumidor.....	62
2.14	Innovación tecnológica y políticas públicas.....	63
2.15	Perspectivas futuras .....	64
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>67</b>
<b>3</b>	<b>QUÍMICA ÁCIDO/BASE Y QUÍMICA DE PRECIPITACIÓN/DISOLUCIÓN 1.....</b>	<b>67</b>
3.1	Propiedades ácido-base del agua.....	67

3.2	El producto iónico del agua.....	68
3.3	El pH: una medida de la acidez .....	68
3.4	Propiedades ácido-base de los óxidos y los hidróxidos .....	69
3.5	Ácidos y bases de Lewis .....	70
3.6	Los equilibrios de iones complejos y la solubilidad.....	70
3.7	Equilibrio y Solubilidad del Plomo Pb.....	72
3.8	Diagrama de distribución de especies (diagrama alfa) en todo el rango de Ph .....	77
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>87</b>
<b>4</b>	<b>QUÍMICA DE COORDINACIÓN (O COMPLEJACIÓN) Y/O QUÍMICA DE PRECIPITACIÓN / DISOLUCIÓN</b>	<b>87</b>
4.1	Complejación.....	87
4.1.1	Complejación del plomo por cloruro.....	87
4.1.2	Abundancia del complejo monocloro-plomo (II) en el agua de mar.....	88
4.1.3	4.1.4 Abundancia de clorocomplejos de PbII en el agua de mar: .....	89
4.1.4	Complejación del Plomo por otros iones .....	91
<b>CAPÍTULO V .....</b>		<b>94</b>

<b>5</b>	<b>QUÍMICA REDOX DEL PLOMO.....</b>	<b>94</b>
5.1	Diagrama de Pourbaix .....	94
5.1.1	Trazo de la región de estabilidad del agua, los límites oxidantes y reductores del agua: .....	97
5.1.2	Ecuaciones de las diferentes reacciones en las que intervienen estas especies .....	98
	<b>GLOSARIO.....</b>	<b>110</b>
	<b>BILBIOGRAFÍA .....</b>	<b>114</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valores límite de exposición al plomo .....	14
<b>Tabla 2.</b> Niveles de acción y valores límites de plomo en sangre según comunidades internacionales. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Niveles máximos permisibles de plomo en suelo en algunas normativas internacionales.....	19
<b>Tabla 4.</b> Límites máximos permisibles de plomo en agua potable.....	31
<b>Tabla 5.</b> Comparación de alimentos con riesgo de contaminación por plomo.....	48
<b>Tabla 6.</b> Marcos regulatorios sobre plomo en alimentos.....	54
<b>Tabla 7.</b> Valores calculados a partir de las ecuaciones 26, 28, 30, 32 y 34.....	83
<b>Tabla 8.</b> Especiación de plomo (II) en agua de mar. ....	93
<b>Tabla 9.</b> Energías de formación, estados y número de oxidación de especies de Pb. ....	96

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Desechos electrónicos del Plomo.....	28
<b>Figura 2.</b> Descargas industriales hacia recursos hídricos. ....	30
<b>Figura 3.</b> Ciclo de monitoreo del Plomo en el agua .....	33
<b>Figura 4.</b> Impacto del Plomo en el medio ambiente.....	35
<b>Figura 5.</b> Impactos en la salud humana del plomo. ....	36
<b>Figura 6.</b> Alimentos con Plomo.....	51
<b>Figura 7.</b> Diagrama logC- pH del sistema $Pb_2 + H_2O$ a 298 °K. ....	76
<b>Figura 8.</b> Diagrama de distribución de especies de hidróxido de plomo en función del pH. ....	86
<b>Figura 9.</b> Diagrama Pourbaix del $Pb^{2+}$ .....	95
<b>Figura 10.</b> Diagrama Pourbaix para el sistema plomo/agua.....	108

## INTRODUCCIÓN

El plomo (Pb) es reconocido mundialmente como un metal tóxico. Desde un punto de vista toxicológico, el plomo es uno de los metales pesados más importantes a considerar. Ocupa el segundo lugar en la lista de “las 20 sustancias más peligrosas”, según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR), 2007). Por otra parte, la Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer (IARC, International Agency for Research on Cancer), ha determinado que el plomo es un probable carcinogénico para los humanos.

El plomo es un metal muy utilizado, pero a la vez es un veneno versátil, sutil y persistente. La exposición significativa al plomo es una amenaza ambiental para la salud óptima y para el desarrollo físico en niños pequeños que afecta a todos los grupos socioeconómicos. El plomo ingresa al medio ambiente durante la producción (incluyendo la minería y la fundición), el uso (baterías, pigmentos, cerámicas, plásticos), el reciclaje, la eliminación de compuestos de Pb, la combustión de combustibles fósiles (carbón, el uso anterior de gasolina con plomo), el uso de fertilizantes minerales y aplicación de lodos de aguas residuales, etc (Centers for Disease Control & (CDC), 1991)(Rieuwerts et al., 1999)(Adriano, 2001). Las estimaciones de las emisiones de fuentes individuales de plomo indican que la atmósfera es el principal receptor inicial y que las fuentes antropogénicas son de magnitud mayores que las fuentes naturales. La contaminación de la atmósfera con plomo se estima en unos 5000 años de antigüedad cuando se introdujeron las primeras tecnologías de fundición ineficientes en el sudoeste de Asia

(procesamiento de sulfuros que contienen aleaciones de Pb-Ag). La producción mundial de plomo en ese momento se estimó en 200 t/año. Durante la era del Imperio Romano, la producción aumentó hasta 80 000 toneladas de plomo por año (Ahlberg et al., 2006; Patterson, 1971). A principios del siglo XX, se produjo un aumento adicional (a 1 000 000 de toneladas de plomo por año) debido a las actividades industriales emergentes junto con la introducción de gasolina con plomo en la década de 1940 (Nriagu, 1990; Shiharata et al., 1980). En los años sesenta y setenta, los aditivos de la gasolina de cadena alquilada se convirtieron en las fuentes más importantes de contaminación atmosférica de plomo en todo el mundo (Nriagu, 1990). La eliminación gradual de la gasolina con plomo aumentó la contribución relativa del plomo industrial en la contaminación atmosférica (Bollhöfer & Rosman, 2001; Nriagu, 1990; Véron et al., 1999).

Los metales pesados, son perjudiciales para los seres vivos. Los iones de metales pesados, tóxicos procedentes de la industria y presente en aguas residuales es una preocupación en los últimos años. Estos contaminantes son descargados por muchos campos de la industria como la galvanoplastia, pinturas, textiles, curtiembres, refinerías de petróleo, Minería y fundiciones. Se ha observado que el aumento de concentración de metales pesados en los sistemas acuáticos puede causar toxicidad, bio-concentración y bio-magnificación. El plomo es peligroso y altamente tóxico para humanos, plantas y animales, los efectos en la salud debidos a la intoxicación por Pb(II) afectan al sistema nervioso, causa insuficiencia renal, produce debilidad, dolor de cabeza, daño cerebral, convulsiones, trastornos de conducta y estreñimiento,

puede causar la muerte en altas concentraciones (WANG et al., 2009).

El presente trabajo revisa a detalle el contaminante plomo empezando por una revisión bibliográfica sobre sus riesgos en la salud, como se presenta en el ambiente y cuáles son las normas nacionales para su regulación, entre lo que podemos destacar que en el Ecuador su presencia está regulado por el Código Orgánico Ambiental con Registro Oficial Suplemento 507 del 12 de junio de 2019, el cual establece principios generales, responsabilidad ambiental, gestión de sustancias químicas, residuos peligrosos y prevención. Se regulan obligaciones de quienes producen, importan, utilizan, o gestionan sustancias químicas, residuos peligrosos y especiales. Esto incluye potencialmente actividades con plomo. El Acuerdo Ministerial No. MAATE-2021-034 para baterías ácido-plomo usadas (BAPU), el Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN), determina plomo total en pinturas mediante NTE INEN 2093-1998. La Ley de regulación de producción y comercialización de combustibles hace mención del uso de tetraetilo de plomo en las gasolinas como agente para aumentar octanaje, con efectos nocivos, todas estas normativas generan un ambiente de regulación de este metal en diversas áreas que tiene como objetivo disminuir mediante límites permisibles o eliminar el plomo en el ambiente.

Seguido se procede a explorar la química del plomo, empezando por la química ácida/base en el cual se analizó el comportamiento del plomo en estado puro y su ion con sus especies ( $PbOH^+$ ,  $Pb(OH)_2$ ,  $Pb(OH)_3^-$ ,  $Pb_2(OH)^{3+}$ ,  $Pb_4(OH)_4^{4+}$ ,  $Pb_6(OH)_8^{4+}$ ), en aguas residuales, para lo cual se indica sus constantes de formación a 298 °K y con estas se procede a realizar el diagrama

logC- pH del sistema  $Pb_2 + H_2OPb_2$ , las líneas representan la relación entre la concentración de equilibrio de las especies y el valor de pH, se determina que  $[Pb^{2+}]$  es la especie soluble predominante en el bajo pH, y el  $[Pb_6(OH)_8^{4+}]$  es la especie predominante en el pH alto.

Se realizó el diagrama de especies (diagrama alfa) para analizar la complejación del metal por  $[OH^+]$ , utilizando las reacciones formadas del Pb (II) con hasta 4 (OH) y utilizando las constantes de equilibrio de cada reacción de procedió a calcular los  $\alpha$  teniendo como premisa que la concentración total es la suma de todos los iones formados y que cada alfa por definición es la división de la especie para la concentración total, obteniendo las ecuaciones y luego graficamos los alfa para cada especie como corresponde: para la especie  $[Pb^{2+}]$  representado por  $\alpha_0$ , especie  $[PbOH^-]$  representado por  $\alpha_1$ , especie  $[Pb(OH)_2]$  representado por  $\alpha_2$ , especie  $[Pb(OH)_3^-]$  representado por  $\alpha_3$  y la especie  $[Pb(OH)_4^-]$  representado por  $\alpha_4$ , nn conclusión para esta parte podemos indicar que a  $pH < 5$  la concentración de  $[Pb^{2+}]$  es dominante y las especie  $[PbOH^-]$  y  $[Pb(OH)_2]$  es la de más fácil formación a condiciones de 298 °K y 1 atmosfera; y si el medio acuoso es básico, la especie  $[Pb(OH)_3^-]$  es la dominante.

Se realiza un análisis del plomo con otras especies que presenta ligandos en este caso se analizó con el ión cloruro, determinando que en los estudios revisados forman un coctel muy toxico en aguas y finalmente se analizó la química redox del metal para lo cual se ha construido el diagrama de pourbaix paso a paso en que se obtuvo las semireacciones para las especies  $PbOH^+$ ,  $Pb(OH)_2$ ,  $Pb(OH)_3^-$ , como condición inicial

se propone que todos los iones formados tienen una concentración 1M, para completar las ecuaciones se aplicó la suma de reacciones con la Ley de Hess y luego de esto se verificó que las reacciones resultantes estén equilibradas y procedemos a obtener las ecuaciones respectivas para el trazo del diagrama. Podemos observar una línea horizontal que representa al sistema  $Pb^{2+}/Pb(s)$  por lo tanto el potencial E es independiente del pH. Las líneas oblicuas como la del equilibrio  $Pb(OH)_3^-/PbO_2(s)$  indican que E es una función del pH y están regidas por la ecuación de Nernst. Las líneas verticales como las del equilibrio  $Pb(OH)_2^0/Pb(OH)_3^-$ , indican que el potencial E es independiente del pH, así también se observa que la región estable de nuestro gráfico está predominada por las especies  $PbOH^+$  y  $Pb^{2+}$ , y la especie más oxidante es la especie  $PbO_2(s)$ , y el más reductor es la especie  $Pb(s)$ .

## CAPÍTULO I

### 1 CONTAMINACIÓN DEL PLOMO EN EL RECURSO HÍDRICO Y PANORAMA INTERNACIONAL

Considerando la extracción minera y la industria metalúrgica, el continente americano es el mayor productor de plomo a nivel mundial (Téllez & Bautista, 2005).

México es uno de los más grandes productores de plomo en América Latina, y este hecho ha traído como consecuencia la contaminación del suelo, aguas, aire y alimentos por plomo, en gran parte debido a los residuos generados por las industrias mineras. En Chihuahua, estado minero por excelencia, se han realizado determinaciones de metales pesados, incluyendo el plomo en suelos contaminados obteniendo elevadas concentraciones (Puga et al., 2006), que sobrepasan los niveles máximos permisibles establecidos por las normas internacionales y nacionales.

En la Tabla 1 se resumen algunas concentraciones de plomo en diferentes actividades, ambientes y alimentos de consumo.

*Tabla 1. Valores límite de exposición al plomo*

Descripción	Concentración
Norma Oficial Mexicana Nom-027-SSA1-1993. Bienes y servicios. Productos de la pesca.	1 mg kg <sup>-1</sup>

Descripción	Concentración
Unión Europea. Comisión de regulación (EC) No <u>1881/2006</u>	0.30 mg kg <sup>-1</sup>
Contaminantes en agua potable (Nivel Máximo contaminante, MCLG).	0
Nivel de acción	15 µg L <sup>-1</sup>
2004 21 CFR 165.110	15 µg L <sup>-1</sup>
Guía para la calidad del agua.	15 µg L <sup>-1</sup>
8 horas de exposición durante 5 días por semana	30 µg dL <sup>-1</sup>
NIOSH 2005(REL).	0.05 mg m <sup>-3</sup>
Guía de calidad del aire. WHO 2000	50 µg m <sup>-3</sup>
OSHA	50 µg m <sup>-3</sup>
Plomo ambiental.	150 µg m <sup>-3</sup>
Plomo ambiental.	150 µg m <sup>-3</sup>
Nivel de acción del plomo ambiental.	150 µg m <sup>-3</sup>
Plomo en aire de trabajo (LMPE-PPT)	0.15 mg m <sup>-3</sup>

Instituto Nacional de Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH)

Límites de exposición recomendada (REL)

NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health)

OSHA (Occupational Safety and Health Administration)

WHO (World Health Organization)

CFR (Code of Federal Regulations) USA.

En 1979, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), promulgó una norma para la exposición ocupacional al plomo, la cual exige que en los lugares de trabajo donde se usa plomo, los empleadores deben controlar la contaminación en el aire (Adriano, 2001). Cuando las concentraciones de plomo en el aire son superiores a  $30 \mu\text{g m}^{-3}$  (promedio durante un turno laboral de 8 horas), los empleadores deben ofrecer un programa de higiene industrial y vigilancia médica (incluida la vigilancia de plomo en sangre).

En México, la norma NOM-026-SSA1-1993 establece que la concentración de plomo, como contaminante atmosférico, no debe rebasar el valor permisible de  $1.5 \mu\text{g m}^{-3}$  (promedio aritmético) en un periodo de tres meses, como protección a la salud de la población susceptible (Adriano, 2001). Esta norma es aplicable a actividades o situaciones ambientales que causen o puedan causar riesgos o daños a la salud de la población.

Por otra parte, la norma NOM-010-STPS-1999 de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social, establece un límite máximo permisible de exposición promedio ponderado en tiempo (LMPE-PPT) de  $150 \mu\text{g Pb m}^{-3}$  de aire, en lugares de trabajo en donde se utilicen o generen polvos que contengan plomo (Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-1999, 1999). La LMPE-PPT, es la concentración promedio ponderada en el tiempo de un contaminante del medio ambiente laboral para una jornada

de 8 horas diarias y una semana laboral de 40 horas, a la cual se pueden exponer la mayoría de los trabajadores sin sufrir daños a su salud.

La norma NOM-199-SSA1-2000 establece el valor criterio para la concentración de plomo en sangre en niños, mujeres embarazadas y en periodo de lactancia en 10 mg dL<sup>-1</sup> (100 µg L<sup>-1</sup>) y el valor criterio para la concentración de Pb en sangre para el resto de la población expuesta no ocupacionalmente en 25 mg dL<sup>-1</sup> (250µg L<sup>-1</sup>). Además, establece niveles de concentración de Pb, en los cuales se deben de tomar acciones preventivas cuando se rebasan estos límites de concentración (Norma Oficial Mexicana NOM-199-SSA1-2000, 2000). Otras referencias para Pb en sangre se presentan en la Tabla 2. Aunque la determinación de plomo en sangre venosa es la prueba más utilizada para monitorear la salud ambiental en centros de trabajo, la Norma Oficial Mexicana NOM-047-SSA1-2011, establece que los análisis también pueden ser realizados en muestras de suero o plasma (Norma Oficial Mexicana NOM-047-SSA1-2011, 2012).

*Tabla 2. Niveles de acción y valores límites de plomo en sangre según comunidades internacionales.*

<b>Tipo muestra</b> <b>(Sangre)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Concentración</b>
<b>ATSDR</b>	Nivel de acción para niños. ATSDR	100 µg L <sup>-1</sup>
<b>OSHA</b>	Escritura de notificación y examen médico	400 µg L <sup>-1</sup>
	Remoción de la exposición	600 µg L <sup>-1</sup>

---

<b>NOM-199</b>	Valor criterio para la concentración de plomo en sangre de niños y mujeres embarazadas y en periodo de lactancia.	100-140 $\mu\text{g L}^{-1}$
<b>NOM-199</b>	El valor criterio para la concentración de plomo en sangre para el resto de la población expuesta no ocupacionalmente.	250-440 $\mu\text{g L}^{-1}$
<b>España</b>	Valores de exposición	70 $\mu\text{g L}^{-1}$
<b>NIOSH</b>	Valores de exposición	60 $\mu\text{g L}^{-1}$

---

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry).

Para el caso del Perú, la presencia de plomo en el aire según Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del plomo en el aire mensual es de  $1.5 \mu\text{g m}^{-3}$ , y el plomo en el aire anual de  $0.5 \mu\text{g m}^{-3}$  (Ministerio del Ambiente (Perú), 2017a). En el suelo, de acuerdo al Decreto Supremo N° 011-2017 –MINAM, los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental de plomo son de  $70 \text{ mg kg}^{-1}$  de materia seca para suelos agrícolas,  $140 \text{ mg kg}^{-1}$  para suelo residencial/parques y de  $800 \text{ mg kg}^{-1}$  para suelo comercial/industrial/extractivos (Ministerio del Ambiente (Perú), 2017c) (Ministerio del Ambiente (Perú), 2017b). Finalmente, en el agua, mediante el Decreto Supremo N° 004-2017–MINAM, los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del plomo es de  $0.01 \text{ mg L}^{-1}$ .

**Tabla 3. Niveles máximos permisibles de plomo en suelo en algunas normativas internacionales.**

<b>Tipo muestra</b> <b>(Suelo)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Concentración</b>
<b>EPA</b>	Suelo de áreas de juego	400 mg kg <sup>-1</sup>
	Suelo en áreas que no son de juego	1200 mg kg <sup>-1</sup>
<b>NOM-147</b> <b>(México)</b>	Uso agrícola/residencial/comercial	400 mg kg <sup>-1</sup>
	Uso industrial	800 mg kg <sup>-1</sup>

EPA (Environmental Protection Ambiental) USA.

En el Ecuador el metal plomo está regulado en diferentes áreas como en los alimentos. La leche cruda bobina según la norma NTE INEN 9 (y Codex Alimentarius) tiene un límite máximo permisible de 0,02 mg Pb kg<sup>-1</sup>, el pescado fresco refrigerado o congelado tiene un límite máximo permisible de 0,3 mg Pb kg<sup>-1</sup> según la norma NTE INEN 183-1. Los aceites y grasas comestibles según el Registro Oficial 359-Suplemento, límite para plomo en aceites/grasas tiene un 0,10 mg Pb kg<sup>-1</sup>

En el área industrial, las pinturas arquitectónicas y/o uso general de pinturas establece dos límites regulatorios: 100 ppm y 600 ppm según el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 061 (Pinturas). Para el consumo de agua se establece la Norma INEN 1108, el límite máximo permisible de plomo es 0,01 mg L<sup>-1</sup>. Para suelos el Anexo 2 del Acuerdo Ministerial 097-A establece límites permisibles para uso

residencial/comercial plomo  $\leq 150 \text{ mg kg}^{-1}$  .

Así también podemos mencionar que plomo es un metal tóxico que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, pero cuyo uso extensivo a lo largo del tiempo ha provocado altos niveles de contaminación ambiental, exposición en la población y serios problemas de salud pública en diversas regiones del mundo.

Entre las principales actividades responsables de liberar plomo al ambiente se encuentran la minería, la metalurgia, los procesos industriales, el reciclaje y su incorporación en múltiples productos. Actualmente, la mayor proporción del plomo producido a nivel global se destina a la fabricación de baterías de plomo-ácido utilizadas en vehículos automotores. No obstante, este material también se emplea en una gran variedad de artículos, tales como pigmentos, pinturas, soldaduras, vidrieras, utensilios de cristal, municiones, esmaltes cerámicos, bisutería, juguetes, ciertos cosméticos y algunos remedios tradicionales.

Los niños pequeños representan el grupo más vulnerable frente a la toxicidad del plomo; ya que su exposición puede generar efectos severos en la salud, incluso provoca efectos irreversibles en el desarrollo cerebral y del sistema nervioso del niño. De igual forma el plomo en adultos, provoca intoxicación crónica, también conlleva consecuencias significativas en la salud; aumentado así una mayor probabilidad de hipertensión, enfermedades cardiovasculares y daño renal. Asimismo, durante el embarazo, la exposición materna frente al plomo puede afectar el crecimiento del feto y aumentar el riesgo de parto prematuro.

## 1.1 Propiedades químicas y físicas del plomo

El plomo cuyo símbolo químico es Pb y proviene del latín plumbum es un elemento químico de la tabla periódica perteneciente al grupo 14. Posee número atómico 82 y una masa atómica de 207,2 g/mol, lo que lo convierte en uno de los metales pesados más representativos y de mayor interés toxicológico según Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR, 2020).

### 1.1.1 Propiedades físicas

- **Apariencia:** Es un metal de color gris azulado, con brillo metálico cuando se pule, aunque tiende a empañarse con rapidez al exponerse al aire, formando una capa protectora de óxido.
- **Densidad:** Presenta una densidad elevada de 11,34 g/cm<sup>3</sup>, lo que le confiere el carácter de “metal pesado”.
- **Punto de fusión y ebullición:** Su punto de fusión es relativamente bajo de 327,5 °C en comparación con otros metales, mientras que su punto de ebullición es alto de 1740 °C. Estas características del Pb lo hacen útil en procesos metalúrgicos y en la fabricación de soldaduras por la industria metalmeccánica.
- **Maleabilidad y ductilidad:** Es un metal blando y fácilmente deformable lo que permite moldearlo en láminas o hilos de espesor manejables; ya sea en el orden de los milímetros.

- **Conductividad:** Tiene una baja conductividad eléctrica y térmica respecto a otros metales, lo que limita su uso en aplicaciones electrónicas.
- **Durabilidad:** El Pb es considerado altamente resistente a la corrosión; especialmente cuando está expuesto al aire gracias a la formación de una película superficial de carbonato básico de plomo (Flora et al., 2012).

### *1.1.2 Propiedades químicas*

- **Estados de oxidación:** El plomo presenta principalmente los estados de oxidación +2 y +4, aunque el más estable y común es el Pb(II). Los compuestos en estado +4 son más oxidantes, pero menos estables.
- **Reactividad:** El plomo metálico es relativamente inerte, pero reacciona lentamente con el oxígeno y el dióxido de carbono atmosféricos, formando óxidos y carbonatos insolubles que le confieren protección contra la corrosión. Reacciona con ácidos como el nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) y el acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), pero no con ácido sulfúrico concentrado debido a la formación de una capa pasiva de sulfato de plomo. Tiene afinidad por el azufre, formando sulfuro de plomo ( $\text{PbS}$ ), el mineral más común de este metal.

### **Compuestos principales del Plomo**

**Óxidos:** óxido de plomo ( $\text{PbO}$ ) y dióxido de plomo ( $\text{PbO}_2$ ).

**Sales:** nitrato de plomo ( $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ), sulfato de plomo ( $\text{PbSO}_4$ ), acetato

de plomo ( $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2$ ).

**Organoplomos:** como el tetraetilo de plomo ( $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ ), antes usado como aditivo en combustibles, hoy restringido por su toxicidad.

## 1.2 Comportamiento en el medio ambiente

La solubilidad del plomo metálico en agua es baja pero sus compuestos pueden variar en movilidad; ya sea como:

- Los carbonatos y sulfatos son poco solubles favoreciendo la acumulación en sedimentos.
- Los acetatos y nitratos son más solubles incrementando el riesgo de transporte en cuerpos de agua.
- En condiciones ácidas, la solubilidad y movilidad del plomo aumentan considerablemente; ya que potencian la contaminación de aguas subterráneas y superficiales (WHO, 2019).

Estas propiedades explican por qué el plomo es un contaminante persistente; aunque el metal elemental se oxida lentamente sus compuestos pueden movilizarse y permanecer en el ambiente durante largos períodos, bioacumulándose en organismos vivos y provocando daños a largo plazo.

## 1.3 Usos industriales del plomo

El plomo ha sido empleado desde la antigüedad en múltiples aplicaciones debido a sus propiedades de maleabilidad, densidad, resistencia a la corrosión y bajo punto de fusión. A pesar de que muchos

de sus usos han sido restringidos en las últimas décadas por razones de salud pública, sigue siendo un metal de alta demanda particularmente en sectores energéticos e industriales sobre todo en países desarrollados (United Nations Environment Programme (UNEP, 2020).

### ***1.3.1 Industria minera y metalúrgica***

El plomo se extrae principalmente a partir de la galena (PbS), su mineral más abundante. La metalurgia del plomo se centra en la fundición y refinación, que permiten obtener plomo metálico y diversas aleaciones. Estas aleaciones se utilizan en la industria para fabricar soldaduras, revestimientos anticorrosivos, blindajes contra radiación y componentes estructurales (International Agency for Research on Cancer [IARC], 2006).

Además, el plomo se combina con antimonio, estaño o cobre para mejorar su dureza y resistencia, aplicaciones importantes en la fabricación de acumuladores eléctricos y piezas para la construcción.

### ***1.3.2 Pinturas***

Durante gran parte del siglo XX, el plomo fue un componente esencial en la producción de pinturas y pigmentos, como el blanco de plomo y el cromato de plomo, utilizados para dar color y aumentar la durabilidad de superficies pintadas. Sin embargo, la exposición a estos compuestos provocó graves casos de intoxicación infantil y ocupacional. Actualmente su uso en pinturas ha sido prohibido o restringido en la mayoría de los países, aunque aún persiste en algunos mercados informales; más aún en países subdesarrollados (Needleman, 2004; WHO, 2019).

### ***1.3.3 Baterías***

El uso predominante del plomo en la actualidad corresponde a las baterías de plomo-ácido, que representan más del 80 % del consumo global del metal. Estas baterías son indispensables para automóviles, sistemas de respaldo energético y equipos industriales. Si bien son reciclables en gran medida, el proceso de reciclaje inadecuado en países en desarrollo constituye una de las principales fuentes de contaminación ambiental (UNEP, 2020).

### ***1.3.4 Combustibles***

Hasta finales del siglo XX, el plomo se utilizó ampliamente en forma de tetraetilo de plomo ( $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ ) como aditivo antidetonante en las gasolinas. Esto permitió mejorar el octanaje y el rendimiento de los motores, pero generó una enorme dispersión atmosférica del metal, con impactos severos en la salud humana y en el ambiente. La eliminación progresiva de la gasolina con plomo a nivel mundial, consolidada en 2021 bajo la iniciativa de Naciones Unidas, es considerada uno de los mayores logros en salud ambiental (Nriagu, 1990; UNEP, 2021).

### ***1.3.5 Plomería***

Históricamente, el plomo fue utilizado en tuberías, soldaduras y accesorios de fontanería, debido a su maleabilidad y resistencia a la corrosión. Sin embargo, la migración de plomo hacia el agua potable constituye una importante vía de exposición, lo que ha llevado a que las normativas modernas prohíban su uso en sistemas de distribución de agua. Aun así, en muchas infraestructuras antiguas el problema persiste

y representa un riesgo sanitario significativo (EPA, 2022).

#### **1.4 Vías de liberación al ambiente**

El plomo puede ingresar al medio ambiente a través de procesos naturales, como la erosión de rocas que contienen minerales plumbíferos, pero la mayor parte de su presencia en agua, aire y suelo proviene de actividades antropogénicas.

Estas actividades han multiplicado la concentración ambiental de plomo en comparación con los niveles naturales, generando un riesgo elevado para los ecosistemas y la salud humana (ATSDR, 2020).

##### ***1.4.1 Fuentes industriales y domésticas***

Las industrias metalúrgicas, mineras, químicas y manufactureras constituyen una de las principales fuentes de liberación de plomo al ambiente. Durante la fundición y refinación de minerales, se generan emisiones atmosféricas y residuos líquidos que contienen compuestos de plomo, los cuales se depositan en cuerpos de agua cercanos o en suelos agrícolas (Flora et al., 2012).

En el ámbito doméstico, las fuentes de exposición al plomo incluyen:

- Corrosión de tuberías y accesorios de plomería de plomo ya que liberan partículas e iones de plomo al agua potable.
- Pinturas a base de plomo en viviendas antiguas mismas que al deteriorarse generan polvo contaminante.

- Combustión de combustibles fósiles especialmente en países donde aún se utiliza carbón o gasolina con residuos de plomo.

Estas fuentes incrementan la carga de plomo en el ambiente urbano afectando directamente la calidad del aire, del agua, alimentos; perjudicando así la salud de las personas (EPA, 2022).

#### ***1.4.2 Desechos electrónicos***

El crecimiento exponencial de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) representa una vía emergente de liberación de plomo. Muchos dispositivos contienen soldaduras a base de plomo, vidrios plomados y placas de circuitos.

Cuando estos residuos se gestionan de forma inadecuada o se amontonan como lo evidencia la Figura 1 donde se generan lixiviados contaminantes que alcanzan fuentes de agua superficial y subterránea (UNEP, 2020).

En países en desarrollo, la informalidad del reciclaje electrónico es especialmente preocupante, ya que trabajadores y comunidades locales quedan expuestos directamente a humos y lixiviados ricos en plomo (Robinson, 2009).



*Figura 1. Desechos electrónicos del Plomo.*

*Fuente: Arcediano Recuperaciones (2020).*

### ***1.4.3 Minería artesanal e informal***

La minería artesanal y de pequeña escala es otra fuente relevante de contaminación por plomo, particularmente en América Latina, África y Asia. Estas actividades, realizadas sin medidas de protección ambiental, provocan la liberación de plomo contenido en minerales como la galena. El material extraído se procesa mediante técnicas rudimentarias que generan vertidos de aguas residuales contaminadas en ríos y quebradas, afectando a comunidades enteras que dependen de estos recursos hídricos (Castillo et al., 2019).

Adicionalmente, la exposición en zonas mineras no solo se limita a los trabajadores, sino también a sus familias, que pueden estar en contacto con polvo y sedimentos contaminados transportados al hogar.

## 1.5 Contaminación del Agua por Plomo

La contaminación de los recursos hídricos por plomo constituye una de las problemáticas ambientales y de salud pública más relevantes a nivel mundial. Aunque este metal no es esencial para los organismos vivos, su presencia en el agua, incluso en concentraciones muy bajas, puede generar efectos crónicos graves debido a su bioacumulación y persistencia en el ambiente (WHO, 2019).

### 1.5.1 Mecanismos de incorporación al recurso hídrico

El plomo llega a cuerpos de agua por diversas vías:

- **Descargas industriales:** Por procesos metalúrgicos, fundiciones, reciclaje de baterías y manufactura de pigmentos liberan efluentes líquidos ricos en compuestos de plomo. Si estos no son tratados adecuadamente, terminan en ríos como se ilustra en la Figura 2, lagunas y aguas subterráneas (Flora et al., 2012).
- **Lixiviación de suelos contaminados:** En suelos con altos niveles de plomo, ya sea por actividades mineras o disposición inadecuada de residuos, las lluvias y la infiltración arrastran partículas e iones hacia los acuíferos.
- **Corrosión de tuberías:** En sistemas de distribución de agua potable con tuberías de plomo o soldaduras plomadas liberan plomo al agua, especialmente cuando la acidez y dureza del agua favorecen su disolución (EPA, 2022).



*Figura 2. Descargas industriales hacia recursos hídricos.*

*Fuente: EcoAvant. (2021).*

### ***1.5.2 Niveles de plomo en cuerpos de agua***

Los niveles permisibles de plomo en agua potable varían según las regulaciones:

- La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece un valor guía de 0,01 mg/L (WHO, 2019).
- La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) fija un límite de acción en 0,015 mg/L (EPA, 2022).
- En Latinoamérica los países adoptan estándares similares, aunque la vigilancia y cumplimiento son limitados.

En muchos cuerpos de agua cercanos a actividades mineras e industriales los valores reportados superan varias veces estas concentraciones; esto representa un riesgo directo para las comunidades que dependen de fuentes de agua en su diario vivir o cotidianidad (Castillo et al., 2019).

La presencia de plomo en los recursos hídricos es una preocupación global debido a sus efectos tóxicos incluso a bajas concentraciones. Por ello, organismos internacionales y gobiernos nacionales han establecido límites máximos permisibles de plomo en agua potable, con el fin de proteger la salud pública y garantizar el acceso a agua segura. Aunque la mayoría de las normativas coinciden en un valor guía cercano a 0,01 mg/L, existen variaciones en función de las políticas de cada país y de la evidencia científica disponible. En la Tabla 4 se presenta una comparación de los valores de referencia establecidos por diferentes organismos internacionales y legislaciones nacionales.

*Tabla 4. Límites máximos permisibles de plomo en agua potable.*

<b>Organismo regulador</b>	<b>Límite máximo permisible (mg/L)</b>	<b>Observaciones</b>
<b>OMS</b>	0,01	Valor guía establecido en las Guías para la calidad del agua potable.
<b>EPA</b>	0,015	Nivel de acción según la Lead and Copper Rule. Si se supera, obliga a acciones correctivas.
<b>Unión Europea con</b>	0,01	Límite paramétrico de calidad del

<b>Directiva 2020/2184</b>		agua de consumo humano.
<b>Health en Canada</b>	0,005	Uno de los valores más estrictos a nivel mundial
<b>NOM-127-SSA1-2021 en Mexico</b>	0,01	Norma oficial para agua potable en el país.
<b>Resolución 2115 de 2007 según Colombia</b>	0,01	Norma para agua destinada al consumo humano.
<b>Ecuador Norma INEN 1108:2020</b>	según 0,01	Norma técnica para agua potable y de consumo humano.

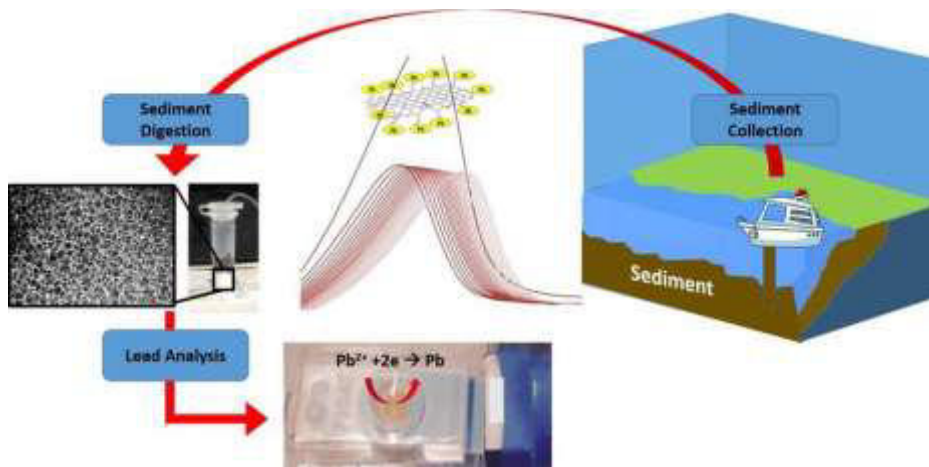
## 1.6 Métodos de detección y monitoreo

La detección del plomo en recursos hídricos se realiza mediante técnicas analíticas de alta sensibilidad; mismas que se enuncian a continuación:

- Espectrofotometría de absorción atómica que es ampliamente usada por su precisión en detectar metales pesados en muestras acuosas.
- Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente que permite medir concentraciones ultratraza en  $\mu\text{g/L}$  de plomo.
- Anodic Stripping Voltammetry que es una técnica electroquímica de bajo costo para monitoreo ambiental.

En este sentido el monitoreo sistemático como se aprecia en la Figura 3 es esencial no solo para cumplir con normas ambientales, sino también

para diseñar estrategias de prevención y mitigación (ATSDR, 2020). La contaminación del agua por plomo se produce principalmente por descargas industriales, lixiviación de suelos y corrosión de sistemas de plomería antiguos. A pesar de que existen normas internacionales claras sobre sus niveles máximos permisibles señaladas anteriormente, en la práctica muchas regiones superan estos límites, con consecuencias ambientales y sanitarias significativas. El monitoreo constante y el uso de técnicas analíticas avanzadas son herramientas clave para controlar este problema.



*Figura 3. Ciclo de monitoreo del Plomo en el agua*

*Fuente: Rutgers University. (2020).*

## 1.7 Impactos de la contaminación por plomo

El plomo es considerado uno de los contaminantes más peligrosos para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, debido a su persistencia en el medio ambiente, su capacidad de bioacumulación y su toxicidad incluso en bajas concentraciones. Los impactos derivados de su

presencia en el recurso hídrico pueden dividirse en tres grandes dimensiones: ambiental, sanitaria y socioeconómica (WHO, 2019; ATSDR, 2020).

### ***1.7.1 Impactos en el ambiente***

Los impactos producidos por el plomo en el medio ambiente se presentan por:

Acumulación en sedimentos en una fracción significativa del plomo vertido en el agua tiende a depositarse en los sedimentos del fondo de ríos, lagunas y embalses. Estos sedimentos funcionan como sumideros, pero también como fuentes secundarias, ya que pueden liberar plomo nuevamente en condiciones de cambios de pH o procesos de resuspensión (Flora et al., 2012).

Bioacumulación y biomagnificación en organismos acuáticos como peces, moluscos y crustáceos incorporan plomo a través de la ingesta de agua y alimentos contaminados. Con el tiempo, este metal se acumula en sus tejidos y a medida que avanza en la cadena trófica puede llegar a niveles peligrosos para depredadores, incluidos los seres humanos (Järup, 2003).

La Alteración de ecosistemas acuáticos debido a la toxicidad del plomo afecta la biodiversidad acuática y sembríos como se aprecia en la Figura 4, reduciendo poblaciones sensibles de invertebrados y peces; lo que altera el equilibrio ecológico y la productividad de los ecosistemas (Castillo et al., 2019).



*Figura 4. Impacto del Plomo en el medio ambiente.*

*Fuente: Madrimasd. (2014).*

### ***1.7.2 Impactos en la salud humana***

El plomo es un neurotóxico potente y sus efectos varían según la edad, la dosis y la duración de la exposición:

En niños Afecta el desarrollo cerebral y del sistema nervioso central, causando déficits cognitivos, alteraciones del aprendizaje, problemas de conducta y disminución del coeficiente intelectual. Incluso niveles bajos en sangre ( $<5 \mu\text{g/dL}$ ) han demostrado provocar daños neurológicos irreversibles (Needleman, 2004; WHO, 2019).

En adultos incrementa el riesgo de hipertensión, enfermedades cardiovasculares, daño renal y trastornos reproductivos. Puede producir alteraciones en la médula ósea y anemia debido a la interferencia con la síntesis de hemoglobina (ATSDR, 2020).

Durante el embarazo la exposición materna al plomo se asocia con restricción del crecimiento fetal, partos prematuros y bajo peso al nacer. El plomo atraviesa la placenta, afectando el desarrollo neurológico del feto (WHO, 2019).



*Figura 5. Impactos en la salud humana del plomo.*

*Fuente: (A Poma, 2013).*

### ***1.7.3 Impactos socioeconómicos***

Los impactos socioeconómicos tras la exposición del plomo se presentan en diversos factores

Costos en la salud pública, esto debido a la exposición al plomo mismo que genera gastos significativos en atención médica, tratamientos crónicos y pérdidas en productividad laboral. Según estimaciones del Banco Mundial, la exposición infantil al plomo representa pérdidas

económicas globales superiores al 1 % del PIB mundial debido a la reducción en el potencial cognitivo de las poblaciones (World Bank, 2016).

Impactos en actividades productivas ya que la contaminación por plomo en cuerpos de agua afecta la pesca y la agricultura, limitando el acceso a alimentos seguros y reduciendo la seguridad alimentaria de comunidades rurales.

También se presentan consecuencias sociales; mismos que en comunidades cercanas a minas, fundiciones o vertederos de residuos electrónicos suelen enfrentar problemas de marginalización y pobreza debido a la degradación ambiental y al deterioro de la salud colectiva (Robinson, 2009).

Los impactos de la contaminación por plomo son multidimensionales: deterioran la biodiversidad, ponen en riesgo la salud humana; especialmente de niños y mujeres embarazadas, generan costos económicos y sociales elevados. Por ello, el plomo es considerado un contaminante prioritario que requiere control y mitigación a nivel global.

#### ***1.7.4 Estrategias de Prevención y Mitigación***

Dado el carácter tóxico y persistente del plomo en los ecosistemas acuáticos, la prevención y mitigación de su contaminación requieren un enfoque multidisciplinario que combine marcos regulatorios, tecnologías de tratamiento, gestión ambiental, educación y participación comunitaria. La implementación de estas estrategias es crucial para

reducir la exposición humana y proteger la biodiversidad acuática (WHO, 2019; UNEP, 2020).

### ***1.7.5 Tecnologías de tratamiento de aguas***

Existen múltiples métodos para remover plomo de las aguas contaminadas, los cuales varían en costo, eficiencia y aplicabilidad:

#### **Procesos físicos:**

Adsorción mediante el uso de carbón activado, zeolitas naturales, bioadsorbentes (cáscaras vegetales, biocarbón).

Filtración con membranas como ósmosis inversa y nanofiltración, con alta eficiencia, pero elevados costos energéticos.

#### **Procesos químicos:**

Precipitación química mediante la adición de agentes como hidróxidos o carbonatos para precipitar el plomo como sales insolubles.

Coagulación-floculación sobre la formación de agregados que sedimentan y eliminan partículas de plomo.

#### **Procesos biológicos:**

Biorremediación a través del empleo de bacterias capaces de inmovilizar o transformar compuestos de plomo.

Fitoremediación con el uso de plantas acuáticas (como *Eichhornia crassipes*) para absorber plomo de cuerpos de agua contaminados (Ali et al., 2013).

El reto principal es adaptar estas tecnologías a contextos rurales y comunidades de bajos recursos, donde las soluciones deben ser de bajo costo, sostenibles y fáciles de mantener.

### ***1.7.6 Programas de concienciación y educación ambiental***

Las estrategias técnicas deben complementarse con la participación social:

Campañas comunitarias a fin de informar a la población sobre los riesgos de consumir agua contaminada, los efectos en la salud y las alternativas seguras de acceso al agua.

Vigilancia ciudadana para involucrar a organizaciones comunitarias y ONGs en programas de monitoreo del agua, fortaleciendo la gobernanza ambiental.

Educación ambiental en escuelas y de esta manera incorporar contenidos sobre metales pesados y su impacto para fomentar una cultura de prevención desde edades tempranas.

Un ejemplo exitoso lo constituye el programa Global Alliance to Eliminate Lead Paint impulsado por la ONU y la OMS, que promueve marcos legales y acciones de sensibilización en más de 100 países (UNEP, 2020).

### ***1.7.7 Innovación y perspectivas futuras***

La investigación científica busca soluciones más efectivas y sostenibles para el control del plomo y así disminuir problemas planteados

anteriormente, las innovaciones se presentan en:

- La Nanotecnología utilizada para nano adsorbentes de hierro, grafeno y óxidos metálicos con alta capacidad de remoción.
- Materiales híbridos bioadsorbentes modificados con nanopartículas para aumentar la eficiencia de captura.
- El uso de la Inteligencia artificial como desarrollo de sistemas predictivos que integran datos de monitoreo para identificar focos de riesgo y optimizar estrategias de tratamiento (Sharma et al., 2022).
- Además, como perspectiva futura la Agenda 2030 y ODS propone la meta 6.1 del Objetivo de Desarrollo Sostenible 6 plantea garantizar agua potable segura para todos, lo cual implica eliminar riesgos asociados al plomo en los sistemas de abastecimiento.

La prevención y mitigación de la contaminación por plomo requiere una combinación de regulación efectiva, aplicación de tecnologías apropiadas, participación ciudadana y avances científicos. Aunque se han logrado progresos importantes; como la eliminación de la gasolina con plomo aún persisten desafíos en países en vías de desarrollo, donde la gestión inadecuada de residuos industriales, mineros y electrónicos sigue comprometiendo la calidad de los recursos naturales hídricos.

## CAPÍTULO II

### 2 CONTAMINACIÓN DEL PLOMO EN LOS ALIMENTOS

La contaminación por plomo en la cadena alimentaria forma una problemática de gran relevancia debido a los efectos tóxicos del metal en la salud humana, esto debido a que es considerado un contaminante químico que se encuentra de manera natural en la corteza terrestre, pero cuya concentración en el ambiente se ha incrementado de forma significativa como consecuencia de las actividades industriales, mineras, agrícolas e incluso domésticas. Una vez liberado al entorno el plomo puede ingresar a los suelos, al agua, aire; siendo transferido a los cultivos y posteriormente a los alimentos consumidos por la población, por esta razón se convierte al plomo en un contaminante de carácter persistente en la cadena alimentaria, capaz de llegar al organismo humano a través de diferentes vías de exposición (WHO, 2019).

El plomo no cumple ninguna función biológica útil en el cuerpo humano; por el contrario, su acumulación genera efectos adversos que afectan de manera irreversible a diferentes órganos y sistemas. Distintos estudios han demostrado que incluso niveles bajos de exposición pueden ser peligrosos, especialmente para los niños donde el plomo es asociado con alteraciones neurológicas, disminución del coeficiente intelectual, problemas de aprendizaje y trastornos del comportamiento (Needleman, 2004). En adultos en cambio la ingesta de plomo a través de alimentos contaminados puede ocasionar daños renales, cardiovasculares y hematológicos, así como también complicaciones en la salud reproductiva, estos efectos explican por qué el plomo se encuentra en la

lista de sustancias químicas de mayor preocupación para la salud pública a nivel mundial (ATSDR, 2020).

Es así que los diferentes organismos internacionales han establecido marcos regulatorios y guías técnicas para limitar la exposición al plomo sobre todo en los alimentos, una de ellas es la Organización Mundial de la Salud y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura que mediante la Comisión del Codex Alimentarius, han definido niveles máximos de contaminantes químicos en alimentos con el fin de proteger a los consumidores y armonizar las normas comerciales internacionales. En el caso del plomo, el Codex ha establecido valores guía para categorías específicas de alimentos como cereales, productos lácteos, pescados, mariscos y alimentos procesados. Los lineamientos sirven como referencia para que los países desarrollen sus propias normativas nacionales y promuevan programas de monitoreo y control.

El estudio de la contaminación del plomo en los alimentos constituye un reto prioritario en materia de salud pública, privada y seguridad alimentaria; ya que se debe asegurar que los alimentos disponibles para la población estén libres de niveles peligrosos de plomo, misma que es una meta alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, particularmente el ODS 2 y el ODS 3. La comprensión de las fuentes de contaminación, así como los efectos en la salud y los marcos normativos existentes resulta esencial para avanzar hacia una alimentación más segura y sostenible a nivel global.

## **2.1 Fuentes de contaminación del plomo en los alimentos**

La contaminación de los alimentos con plomo puede producirse en diferentes etapas de la cadena alimentaria: desde el cultivo en suelos contaminados y el riego con aguas residuales, hasta el procesamiento, almacenamiento y transporte. Estos factores, sumados al uso de materiales que contienen plomo en envases y utensilios, aumentan significativamente el riesgo de exposición a este metal pesado en la dieta diaria de las poblaciones (FAO/WHO, 2011; WHO, 2019).

## **2.2 Contaminación en cultivos**

Una de las principales vías de ingreso del plomo a los alimentos es a través de los cultivos agrícolas. Cuando los suelos están contaminados por actividades mineras, industriales o por el uso prolongado de pesticidas y fertilizantes con impurezas metálicas, las plantas pueden absorber plomo mediante sus raíces. Este proceso se intensifica cuando se emplea agua contaminada en el riego, ya que las partículas y compuestos solubles de plomo presentes en el agua se incorporan fácilmente a los tejidos vegetales (Ali et al., 2013). Como resultado, frutas, hortalizas y cereales cultivados en estos ambientes pueden contener concentraciones significativas de plomo, que luego ingresan a la cadena alimentaria humana.

## **2.3 Procesamiento y manipulación de alimentos**

Además de la fase agrícola el plomo puede incorporarse durante el procesamiento y la manipulación de los alimentos.

La migración de plomo puede ocasionarse desde envases, utensilios y equipos de cocina, además de recipientes metálicos soldados con plomo, utensilios de cocina esmaltados y equipos industriales con componentes plomados pueden liberar este contaminante durante la preparación y cocción de los alimentos. Estudios recientes también han demostrado que las ollas y platos esmaltados con plomo liberan cantidades significativas del metal cuando se usan con alimentos ácidos, como jugos cítricos o salsas de tomate (ATSDR, 2020).

La Contaminación durante la producción en la industria alimentaria en cambio de produce por el contacto de los alimentos con maquinaria y tuberías antiguas que contienen plomo, mismos que pueden favorecer la migración del mismo. La falta de controles en el reciclaje de envases o la reutilización de materiales contaminados incrementa el riesgo de contaminación cruzada (Codex Alimentarius, 2011).

## **2.4 Almacenamiento y transporte**

El plomo también puede incorporarse a los alimentos durante su almacenamiento y transporte de diversas formas, estas formas pueden afectar gravemente a la salud humana.

El uso de soldaduras con plomo en latas y recipientes utilizaban soldaduras de plomo en sus uniones, lo que provocaba una migración directa hacia los alimentos; aunque este uso está prohibido en la mayoría de los países, aún persiste en mercados informales o en países con regulaciones poco estrictas sobre todo en América del sur (WHO, 2019). El uso de recipientes de cerámica artesanal o vidrios decorativos que contienen plomo en su esmalte sigue siendo también una fuente

importante de exposición alimentaria, además el riesgo aumenta cuando se utilizan para almacenar bebidas alcohólicas o alimentos ácidos, ya que la acidez facilita la disolución del plomo y su transferencia al alimento (Flora et al., 2012).

La contaminación de los alimentos por plomo es el resultado de una cadena compleja de factores; mismos que van desde el uso de suelos y aguas contaminadas en la agricultura, hasta la migración desde materiales utilizados en el procesamiento, almacenamiento y transporte, la multiplicidad de fuentes hace indispensable un enfoque integral de control que abarque tanto la producción primaria como la transformación y distribución de los alimentos.

## **2.5 Alimentos con mayor riesgo de contaminación por plomo**

La contaminación por plomo no afecta de forma uniforme a todos los alimentos, sino que depende de factores como el origen geográfico, el tipo de producción, el contacto con fuentes contaminantes y los procesos de almacenamiento. Los alimentos más susceptibles de presentar concentraciones de plomo son aquellos que se cultivan en suelos o con agua contaminada, los productos de origen animal expuestos a bioacumulación y los alimentos procesados que han tenido contacto con materiales plomados (FAO/WHO, 2011; WHO, 2019).

### **2.5.1 *Vegetales y frutas***

Las frutas y hortalizas pueden acumular plomo a través de la absorción radicular cuando se cultivan en suelos contaminados o irrigados con aguas residuales. Estudios en zonas urbanas han reportado altos niveles

de plomo en espinaca, lechuga, zanahorias y papas debido a la deposición atmosférica de emisiones vehiculares y polvo industrial (Khan et al., 2015). La bioacumulación en vegetales representa un riesgo elevado, ya que son alimentos de consumo diario y forman parte esencial de la dieta infantil.

### ***2.5.2 Cereales y legumbres***

Los cereales como arroz, maíz y trigo, así como las legumbres (frijoles, lentejas), pueden absorber plomo durante el cultivo en suelos contaminados. El arroz, en particular, ha sido señalado como un cultivo vulnerable debido a su producción en ambientes inundados, lo que facilita la solubilidad y absorción de metales pesados (Meharg et al., 2013). Esto resulta preocupante en países donde el arroz constituye la base de la alimentación.

### ***2.5.3 Productos de origen animal***

Los animales de pastoreo o de granja pueden ingerir plomo a través de alimentos contaminados, agua o suelos. Como consecuencia, se han detectado residuos en leche, carne y huevos. El plomo ingerido tiende a acumularse en huesos e hígado, órganos que en algunas culturas forman parte de la dieta humana (Miranda et al., 2011). La exposición alimentaria a través de productos de origen animal se intensifica en zonas rurales cercanas a industrias mineras o a vertederos de residuos electrónicos.

#### **2.5.4 *Pescados y mariscos***

Los ecosistemas acuáticos son especialmente vulnerables al plomo, que se deposita en sedimentos y entra en la cadena trófica a través del plancton y organismos bentónicos. Por ello, los pescados, crustáceos y moluscos pueden contener concentraciones elevadas de plomo, en particular en áreas cercanas a descargas industriales o puertos (Castillo et al., 2019). Ejemplos incluyen mejillones, ostras y peces demersales, que tienden a acumular metales pesados en sus tejidos blandos.

#### **2.5.5 *Bebidas y alimentos procesados***

Los alimentos industrializados también pueden ser fuente de plomo debido a la migración desde envases y recipientes. Enlatados antiguos con soldaduras de plomo, dulces procesados en condiciones precarias, bebidas almacenadas en recipientes de cerámica artesanal esmaltada y ciertos condimentos o especias adulteradas han mostrado niveles peligrosos del metal (Codex Alimentarius, 2011; WHO, 2019). Estos casos son particularmente problemáticos porque suelen afectar a poblaciones infantiles, que consumen caramelos, golosinas y jugos en mayor proporción.

Los alimentos con mayor riesgo de contaminación por plomo incluyen tanto productos frescos (vegetales, frutas, cereales) como alimentos de origen animal y procesados presentados en la Tabla 5. La bioacumulación en ecosistemas acuáticos y la migración desde envases y utensilios representan factores críticos. Por ello, los programas de vigilancia alimentaria priorizan estas categorías en sus planes de control, con el fin de proteger a las poblaciones más vulnerables.

*Tabla 5. Comparación de alimentos con riesgo de contaminación por plomo.*

<b>Grupo alimenticio</b>	<b>Vía principal de contaminación</b>	<b>Ejemplos</b>	<b>Riesgos principales para la salud</b>	<b>Referencias</b>
<b>Vegetales y frutas</b>	Absorción radicular en suelos contaminados y riego con aguas residuales; deposición atmosférica.	Lechuga, espinaca, zanahoria, papa.	Daños neurológicos y cognitivos en niños; riesgo de exposición crónica por consumo frecuente.	Khan et al., 2015; WHO, 2019
<b>Cereales y legumbres</b>	Cultivo en suelos y aguas con plomo; acumulación en ambientes inundados.	Arroz, maíz, trigo, frijoles, lentejas.	Bioacumulación; exposición crónica en países donde el arroz es alimento básico.	Meharg et al., 2013
<b>Productos de origen</b>	Ingesta de pasto, agua o piensos	Leche, carne, hígado,	Daño renal y cardiovascular; riesgo de	Miranda et al., 2011

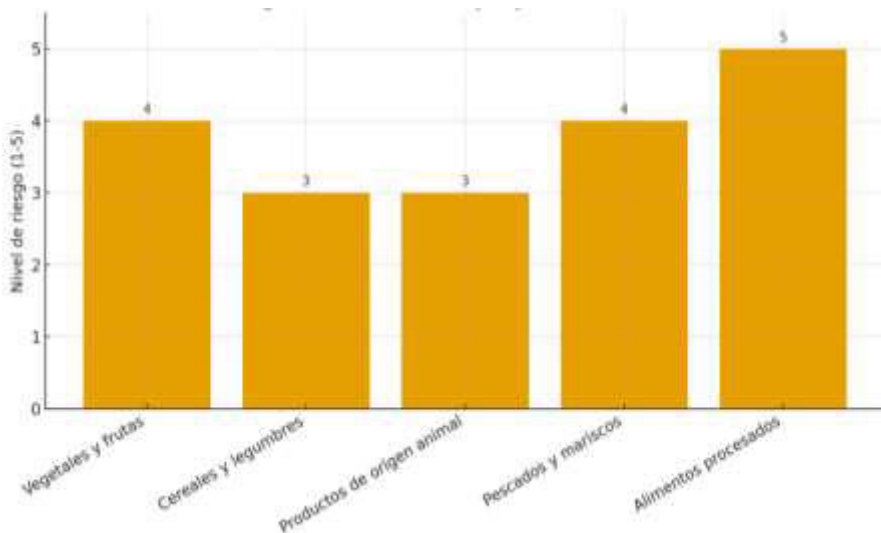
<b>animal</b>	contaminado s; bioacumulaci ón en tejidos.	huevos.	transmisión a niños vía lácteos.	
<b>Pescados y mariscos</b>	Bioacumulac ión en ecosistemas acuáticos contaminado s; depósito en sedimentos.	Mejillone s, ostras, peces demersale s.	Bioacumulaci ón y biomagnificaci ón; riesgo para poblaciones costeras.	Castillo et al., 2019
<b>Aliment os procesad os</b>	Migración desde envases y recipientes con plomo; uso de cerámicas y vidrios esmaltados.	Conservas , dulces, jugos, bebidas almacena das en cerámica artesanal.	Exposición infantil elevada; intoxicaciones agudas documentadas.	Codex Alimentari us, 2011; WHO, 2019

En la Figura 6 de barras se aprecia como se compara los niveles relativos de riesgo de contaminación por plomo en diferentes grupos de alimentos; la figura se muestra en una escala de 1 a 5, donde los alimentos procesados presentan el nivel de riesgo más alto, es decir 5; debido principalmente a la migración de plomo desde envases,

soldaduras y cerámicas esmaltadas lo que incrementa la posibilidad de intoxicaciones agudas, especialmente en niños. En segundo lugar, los vegetales y frutas con nivel 4 muestran un riesgo elevado por la absorción radicular de plomo en suelos contaminados y el riego con aguas residuales, representando una fuente constante de exposición crónica; un nivel parecido se registra en pescados y mariscos, que pueden acumular plomo en ecosistemas acuáticos contaminados, generando riesgos de bioacumulación y biomagnificación en la cadena trófica.

Los cereales y legumbres, además de los productos de origen animal ubicados en un nivel 3 presentan un riesgo moderado, esto debido a que están asociados principalmente al cultivo en suelos contaminados y a la bioacumulación en tejidos animales. Sus niveles de exposición pueden ser más bajos que en otros grupos; pero su consumo frecuente los convierte en una fuente significativa de ingreso de plomo en la dieta.

El gráfico evidencia que los mayores riesgos se concentran en los alimentos procesados y los vegetales, lo que refleja la necesidad de fortalecer las medidas de control tanto en la producción agrícola como en la industria alimentaria.



**Figura 6. Alimentos con Plomo.**

## **2.6 Efectos en la salud humana**

La exposición al plomo a través de los alimentos representa una de las principales vías de intoxicación en la población general. A diferencia de otros contaminantes, el plomo no tiene una función biológica en el organismo humano y se acumula progresivamente en huesos, riñones y tejidos blandos, lo que genera daños irreversibles incluso a bajas concentraciones (WHO, 2019). Los efectos sobre la salud dependen de factores como la edad, el estado nutricional, la dosis y la duración de la exposición.

## **2.7 Poblaciones vulnerables**

### **2.7.1 Niños y lactantes**

Los niños pequeños constituyen el grupo más vulnerable a la toxicidad del plomo. Su sistema digestivo absorbe una proporción mayor del metal

en comparación con los adultos (hasta un 50 % de la dosis ingerida), y su organismo aún en desarrollo carece de mecanismos eficientes para eliminarlo (Needleman, 2004). El plomo afecta directamente el sistema nervioso central, generando déficits en el desarrollo cognitivo, disminución del coeficiente intelectual, problemas de aprendizaje, déficit de atención y alteraciones de la conducta. Incluso niveles muy bajos en sangre, valor como de  $<5 \mu\text{g/dL}$  han sido asociados con efectos neurológicos irreversibles (WHO, 2019).

### ***2.7.2 Mujeres embarazadas***

Durante el embarazo, el plomo representa un riesgo tanto para la madre como para el feto. El metal atraviesa la placenta y puede afectar el desarrollo neurológico fetal, además de provocar restricción del crecimiento intrauterino, parto prematuro y bajo peso al nacer (ATSDR, 2020). Las mujeres embarazadas también son susceptibles a desmineralización ósea, lo que libera plomo acumulado en los huesos hacia la sangre, aumentando la exposición del feto.

### ***2.7.3 Efectos a corto plazo***

La intoxicación aguda por plomo, aunque menos frecuente que la exposición crónica, puede manifestarse con síntomas inespecíficos que afectan principalmente al sistema digestivo. Entre ellos destacan:

- Trastornos gastrointestinales
- Pérdida de apetito
- Síntomas asociados

Estos efectos suelen aparecer en contextos de consumo de alimentos altamente contaminados, como bebidas almacenadas en recipientes esmaltados con plomo o dulces adulterados.

#### ***2.7.4 Efectos a largo plazo***

La exposición crónica al plomo, derivada de la ingesta continua de pequeñas cantidades en alimentos y agua, genera consecuencias graves y permanentes:

- Alteraciones neurológicas con daño irreversible en el cerebro y el sistema nervioso periférico
- Anemia ya que el plomo interfiere en la síntesis de hemoglobina al inhibir enzimas clave como el ácido  $\delta$ -aminolevulínico deshidratasa.
- Daño renal debido a la acumulación en riñones provocando nefropatías crónicas, disminución del filtrado glomerular y alteraciones en la regulación de la presión arterial.
- Enfermedades cardiovasculares con una relación entre la exposición prolongada al plomo y el incremento de la presión arterial, la arteriosclerosis y el riesgo de infartos.

Los efectos del plomo en la salud humana abarcan desde síntomas gastrointestinales en intoxicaciones agudas hasta consecuencias irreversibles en el sistema nervioso, renal y cardiovascular en exposiciones prolongadas. Los niños y mujeres embarazadas son los grupos más afectados, lo que refuerza la necesidad de controles estrictos

en la cadena alimentaria y de políticas de prevención.

## 2.8 Normativas y límites máximos permisibles en alimentos

Los límites para plomo en alimentos han evolucionado hacia umbrales cada vez más estrictos, especialmente en productos destinados a lactantes y niños pequeños; es así como se presentan tres marcos que guían la mayoría de las regulaciones nacionales como el Codex Alimentarius, la Unión Europea, y la FDA/USDA; mismos que son evidenciados en la Tabla 4. En el caso de la adopción nacional en América Latina tiende a armonizar con Codex y, en algunos casos, toma como referencia los límites de la UE para matrices específicas.

En todos los marcos, el criterio central es ALARA, con límites más bajos para fórmulas infantiles, alimentos para lactantes especialmente niños y jugos, además de límites diferenciados para pescados y mariscos por bioacumulación y hortalizas de hoja por mayor transferencia desde suelo. Un resumen regulatorio se presenta en la Tabla 6.

*Tabla 6. Marcos regulatorios sobre plomo en alimentos.*

<b>Marco y Organismo</b>	<b>Alcance principal</b>	<b>Principio regulatorio</b>	<b>Ejemplos representativos</b>	<b>Dónde consultar el valor exacto</b>
Codex Alimentarius	Establece Niveles Máximos por grupo de alimentos tales como:	Protección de la salud y comercio justo; ALARA.	Niveles máximos más estrictos para fórmulas infantiles y alimentos para bebés; niveles	Codex General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed lists

	cereales, hortalizas, frutas, productos de pesca, fórmulas infantiles, etc.		diferenciados para cereales y hortalizas; valores más altos permitidos en bivalvos por bioacumulación.	actualizadas por producto.
Unión Europea Reglamento o (UE) 2023/915	Niveles máximos legalmente vinculantes para todas las categorías comercializadas en la UE. Sustituye y actualiza normas previas (p. ej., 1881/2006).	ALARA y enfoque de poblaciones vulnerables; controles oficiales.	Límites bajos para alimentos infantiles y fórmulas; límites específicos para hortalizas de hoja, raíces, cereales; categorías de pescados/mariscos diferenciadas (p. ej., bivalvos).	muy para (UE) 2023/915 y sus anexos por alimento.
Estados Unidos con FDA USDA	La FDA emite niveles de acción por categoría: jugos, alimentos para bebés, dulces, especias; y estándar para agua embotellada.	Reducción gradual con metas por etapa; acción correctiva si se superan niveles de guía.	Niveles de acción bajos en jugos y alimentos infantiles; controles específicos en dulces y especias por riesgos históricos.	FDA Guidance/Acti on Levels y 21 CFR.

---

América Latina	Muchos países armonizan con Codex y adoptan límites similares; algunos incorporan categorías UE.	Convergencia hacia Codex; prioridad a matrices infantiles y productos de alto consumo.	Normas sanitarias nacionales suelen replicar ML de Codex para cereales, hortalizas y productos de pesca; vigilancia reforzada en artesanías cerámicas por migración de plomo.	Reglamentos sanitarios nacionales y compendios oficiales (p. ej., RTCA, NOM, Resoluciones sanitarias).
----------------	--	--	---	--

---

Nota: Importante: Los ML varían por alimento (p. ej., no es el mismo límite para espinaca que para arroz o bivalvos; y los alimentos infantiles tienen valores sustancialmente más bajos). Para trabajo académico o informes técnicos, cita el valor del anexo específico de Codex/UE/FDA correspondiente a la matriz que analices.

## 2.9 Métodos de detección y monitoreo en alimentos

La detección y el monitoreo del plomo en alimentos constituyen un componente esencial en las políticas de inocuidad alimentaria y de protección de la salud pública. Dado que este metal no presenta olor, color ni sabor característico en los alimentos, es indispensable el uso de técnicas analíticas de alta sensibilidad, junto con sistemas de control integrados a lo largo de la cadena alimentaria. Estos procesos permiten identificar fuentes de contaminación, garantizar el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales y reducir la exposición de la

población a niveles peligrosos de plomo (Codex Alimentarius, 2011; WHO, 2019).

### **2.9.1 Métodos químicos**

Los métodos instrumentales de análisis químico son la herramienta fundamental para la detección del plomo en matrices alimentarias, ya que permiten medir concentraciones en rangos de mg/kg (ppm) o incluso  $\mu\text{g}/\text{kg}$  (ppb). Entre los más empleados se destacan:

- Espectrofotometría de absorción atómica.
- Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente.
- Voltametría de redisolución anódica.

La elección de la técnica depende de factores como la disponibilidad de recursos, la sensibilidad requerida y el volumen de muestras a analizar; en la práctica, los laboratorios de referencia suelen combinar AAS e ICP-MS para garantizar resultados confiables.

### **2.10 Sistemas de control en la cadena alimentaria**

El control del plomo en los alimentos no se limita al análisis de laboratorio, sino que requiere un enfoque preventivo a lo largo de toda la cadena de producción y distribución; por ende, el tema se articula principalmente a través de:

- Buenas Prácticas Agrícolas mismas que incluyen el uso de suelos y aguas libres de contaminantes, la gestión adecuada de fertilizantes y pesticidas, y la implementación de barreras para

reducir la deposición de contaminantes atmosféricos.

- Buenas Prácticas de Manufactura más aun en la industria alimentaria, implican la selección de equipos y utensilios libres de plomo, el uso de envases seguros y el control de posibles fuentes de migración durante el procesamiento.
- Sistemas de Análisis de Peligros y Puntos Críticos de Control que permiten identificar etapas críticas en las que puede ocurrir contaminación por plomo y establecer medidas correctivas inmediatas; por ejemplo, verificar la calidad del agua utilizada en procesos industriales o el control de materias primas provenientes de zonas de riesgo (FAO/WHO, 2011).
- Trazabilidad alimentaria de los sistemas de rastreo ya que permiten identificar el origen de lotes contaminados y retirar productos del mercado de manera eficiente.

Mecanismos que buscan reducir el riesgo de exposición antes de que el alimento llegue al consumidor, cumpliendo así con el principio de prevención de la inocuidad alimentaria.

### **2.11 Programas de vigilancia alimentaria en salud pública**

A nivel nacional e internacional, se implementan programas de monitoreo y vigilancia alimentaria que complementan los análisis de laboratorio y los sistemas de control preventivo. Los ministerios de salud y agencias de inocuidad alimentaria realizan muestreos periódicos en mercados, industrias y puntos de importación y exportación para

verificar el cumplimiento de las normas establecidas.

Los Programas internacionales mediante organismos como la FAO, OMS desarrollan planes coordinados de vigilancia del plomo y otros contaminantes químicos en alimentos, con el fin de generar bases de datos globales que sirvan de referencia para las evaluaciones de riesgo (FAO/WHO, 2011). Además, la alerta temprana y gestión de riesgos en sistemas como la Red Internacional de Autoridades de Inocuidad de los Alimentos permiten compartir rápidamente información sobre lotes de alimentos contaminados por plomo, reduciendo el tiempo de respuesta ante emergencias.

El Enfoque en poblaciones vulnerables de muchos países priorizan la vigilancia en productos consumidos por niños y lactantes, como fórmulas infantiles, cereales y jugos, dado que representan la principal vía de exposición en este grupo (WHO, 2019). El fortalecimiento de estos programas resulta crucial en países en desarrollo, donde la falta de recursos técnicos puede limitar la capacidad de detección oportuna; la cooperación internacional y el acceso a tecnologías de laboratorio más avanzadas son factores determinantes para mejorar la eficacia de la vigilancia alimentaria.

Los métodos de detección del plomo en alimentos se basan en técnicas químicas de laboratorio, entre las que destacan la AAS, el ICP-MS y la voltametría, cada una con ventajas y limitaciones. Estos métodos deben integrarse en sistemas preventivos de control a lo largo de la cadena alimentaria, mediante BPA, BPM y HACCP, garantizando la trazabilidad y minimizando la exposición. Finalmente, los programas de

vigilancia alimentaria en salud pública constituyen el marco institucional que permite monitorear, detectar y responder a la contaminación por plomo a escala nacional e internacional, protegiendo especialmente a las poblaciones vulnerables.

## **2.12 Estrategias de prevención y mitigación en alimentos**

La prevención y mitigación de la contaminación por plomo en alimentos requiere un enfoque integral que abarque desde la producción primaria hasta la distribución y consumo. Estas estrategias deben combinar acciones técnicas, normativas y educativas, con especial atención en los grupos vulnerables de la población. Su objetivo principal es reducir al mínimo la exposición dietética al plomo, garantizando alimentos seguros y cumpliendo con los marcos regulatorios internacionales (FAO/WHO, 2011; WHO, 2019).

### ***2.12.1 Buenas prácticas agrícolas (BPA)***

Para la etapa de producción primaria, es fundamental implementar medidas que eviten la incorporación de plomo a los cultivos, es así que la Selección de suelos y aguas seguras permite evitar el uso de suelos contaminados por actividades industriales, mineras o cercanos a carreteras de alto tráfico; asimismo, garantizar que el agua de riego esté libre de metales pesados.

### ***2.12.2 Control en la industria alimentaria***

Durante el procesamiento y manipulación de alimentos, la industria debe aplicar protocolos estrictos para minimizar la migración de plomo,

en donde existen:

- Buenas prácticas de manufactura.
- Envases seguros.
- Análisis de materias primas.
- Sistema HACCP.

### ***2.12.3 Sustitución de materiales contaminantes en envases y utensilios***

Una de las fuentes más persistentes de exposición al plomo en alimentos es la migración desde materiales en contacto directo con los productos alimenticios, por ejemplo, las soldaduras de plomo en latas de conserva y los esmaltes de cerámica y vidrio han sido responsables de numerosos casos de intoxicación; especialmente en comunidades donde las prácticas artesanales persisten sin controles sanitarios, mismos que son considerados procesos insalubres. La migración del contaminante ocurre con mayor facilidad en presencia de alimentos ácidos, como jugos cítricos, vino, salsas de tomate o bebidas alcohólicas, lo que acelera la solubilización del plomo y su transferencia al alimento, consideraos productos de consumo masivo (Flora et al., 2012).

La estrategia más eficaz para mitigar el riesgo de contaminación es la sustitución total de materiales contaminantes por alternativas seguras sobre todo en la industria moderna, debido a que el acero inoxidable, vidrio libre de plomo y los polímeros certificados para uso alimentario se han convertido en la norma para uso alimenticio. Sin embargo, en

muchas regiones rurales y contextos artesanales, la producción de cerámicas esmaltadas con compuestos plomados sigue siendo común debido a su bajo costo y tradición cultural, por ello, es necesario implementar programas de reconversión tecnológica, apoyados por el Estado y organismos internacionales, que ofrezcan materiales alternativos a los artesanos sin afectar su sustento económico (Codex Alimentarius, 2011).

El control en frontera y en mercados internos también juega un papel clave, ya que la importación y comercialización de utensilios que no cumplen con estándares internacionales de inocuidad sigue representando un riesgo, es así que los sistemas regulatorios más avanzados (p. ej., Unión Europea, FDA) incluyen límites de migración específicos para materiales en contacto con alimentos, lo que garantiza mayor protección al consumidor.

La prevención y mitigación de la contaminación por plomo en alimentos deben abordarse en múltiples niveles: desde la producción agrícola con BPA, el control industrial mediante BPM y HACCP, la sustitución de envases contaminantes y la educación del consumidor, hasta la incorporación de innovaciones tecnológicas y la aplicación de políticas públicas más estrictas. Solo una estrategia integral puede reducir los riesgos de exposición y proteger la salud de las poblaciones más vulnerables.

### **2.13 Educación y sensibilización del consumidor**

Más allá de los aspectos técnicos y regulatorios, la lucha contra la exposición alimentaria al plomo depende en gran medida de la

información y sensibilización de los consumidores, más aun en comunidades donde todavía se utilizan utensilios de cerámica esmaltada con plomo o recipientes metálicos de fabricación artesanal, el desconocimiento del riesgo facilita la exposición continua a este contaminante. Por ello, la educación en salud pública es esencial para modificar hábitos de consumo y fomentar la elección de materiales seguros (WHO, 2019).

Desde este punto de vista las campañas de educación deben enfocarse en explicar de forma clara los riesgos del plomo, resaltando que no existe un nivel seguro de exposición, especialmente en niños y mujeres embarazadas; además, es fundamental proporcionar información práctica y culturalmente adaptada, como evitar almacenar alimentos ácidos en cerámica artesanal no certificada o preferir envases de vidrio y acero inoxidable.

En este sentido, los programas de etiquetado transparente y las certificaciones de productos libres de plomo también juegan un papel importante, ya que permiten a los consumidores identificar fácilmente los productos más seguros. Asimismo, la participación comunitaria en actividades de monitoreo, vigilancia ciudadana y promoción de la inocuidad alimentaria fortalece la confianza social y la corresponsabilidad en la prevención de riesgos.

## **2.14 Innovación tecnológica y políticas públicas**

En el sector tecnológico, los progresos en el desarrollo de nanomateriales que absorben y en filtros inteligentes permiten disminuir la cantidad de plomo en agua para riego y en procesos industriales, lo

que baja el riesgo de contaminación en la producción agrícola (Sharma et al., 2022); también se toma en consideración a la biotecnología enfocada en cultivos que pueden eliminar metales pesados ya que ofrece nuevas oportunidades para asegurar la alimentación. Las políticas públicas tienen un rol fundamental así con iniciativas como Closer to Zero de la FDA en Estados Unidos establecen objetivos graduales para reducir el plomo en alimentos para niños, con etapas de cumplimiento que se verifican mediante análisis científicos y conversaciones con la industria. Además, la Unión Europea aplica el principio ALARA en sus leyes, asegurando que los niveles de plomo en alimentos sean los más bajos posibles de acuerdo con la tecnología que se encuentra disponible (Unión Europea, 2023).

### **2.15 Perspectivas futuras**

El control de la contaminación por plomo en alimentos es un reto que requiere una visión benefactora, a pesar de que los avances en la identificación de fuentes de exposición y en la creación de normativas internacionales, la persistencia del plomo en el ambiente y su carácter bioacumulativo exigen medidas innovadoras y sostenibles. Las perspectivas futuras se centran en tres dimensiones clave que son: investigación científica, innovación tecnológica y fortalecimiento de la gobernanza global.

Se prevé para el ámbito científico un mayor desarrollo de investigaciones sobre la transferencia del plomo en la cadena alimentaria a fin de comprender cómo interactúa el plomo con otros contaminantes químicos, cómo se acumula en distintas matrices

alimentarias y cuáles son los factores ambientales que intensifican su absorción por plantas y animales. En base a los estudios realizados se espera un avance significativo en el área de la epidemiología ambiental, con el fin de establecer correlaciones más precisas entre la exposición dietética al plomo y enfermedades crónicas presentadas en las personas como hipertensión, trastornos neurológicos y patologías renales (Lanphear et al., 2018).

Las innovaciones tecnológicas en cambio apuntan a la reducción activa del plomo en alimentos y aguas asociadas a la producción agrícola e industrial; por eso existen estudios sobre el desarrollo de nanomateriales adsorbentes, biofiltros y membranas inteligentes mismos que prometen mejorar la eliminación del plomo en procesos de tratamiento de agua y en sistemas de purificación utilizados por la industria alimentaria (Sharma et al., 2022). La aplicación de la biotecnología agrícola es considerada como un avance tecnológico relevante que permitirá el diseño de cultivos con menor capacidad de acumulación de metales pesados, contribuyendo a la seguridad alimentaria en regiones de alto riesgo. Estas tecnologías, si bien aún en fases de investigación y aplicación piloto, ofrecen alternativas para reducir la exposición al plomo en poblaciones vulnerables.

Una vez en claro se pretende que las políticas públicas y la cooperación internacional deben adaptarse a las nuevas evidencias científicas con base en los programas de reducción progresiva, como Closer to Zero de la FDA en Estados Unidos; ya que marcan una tendencia que podría replicarse en otros países, estableciendo metas temporales verificables para disminuir el plomo en alimentos infantiles y de alto consumo. La

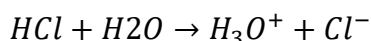
Unión Europea, con la aplicación del principio de ALARA, seguirá siendo un referente en la fijación de estándares globales. No obstante, en regiones de bajos ingresos y países no desarrollados el reto será fortalecer capacidades técnicas y de laboratorio para cumplir con estas regulaciones, lo que requerirá obligatoriamente apoyo de organismos internacionales como la FAO, OMS y la Red INFOSAN.

## CAPÍTULO III

### 3 QUÍMICA ÁCIDO/BASE Y QUÍMICA DE PRECIPITACIÓN/DISOLUCIÓN 1

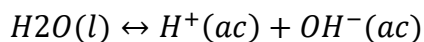
#### Química Ácido – Base (Brønsted)

Una definición de ácidos y bases es el concepto de par conjugado ácido-base, que se define como un ácido y su base conjugada o como una base y su ácido conjugado. La base conjugada de un ácido es la especie que resulta cuando el ácido pierde un protón. A la inversa, un ácido conjugado resulta de la adición de un protón a una base. Todo ácido tiene una base conjugada y toda base tiene un ácido conjugado. Por ejemplo, el ion cloruro ( $Cl^-$ ) es la base conjugada que se forma a partir del ácido HCl, y el  $H_3O^+$  es la base conjugada a partir del ácido  $H_2O$  (ion hidronio) (Chang, 2001).



#### 3.1 Propiedades ácido-base del agua

Como es bien sabido, el agua es un disolvente único. Una de sus propiedades especiales es su capacidad para actuar como ácido o como base. El agua se comporta como una base en reacciones con ácidos como HCl y  $CH_3COOH$  y funciona como un ácido frente a bases como el  $NH_3$ . El agua es un electrólito muy débil y, por tanto, un mal conductor de la electricidad, pero experimenta una ligera ionización:



En ocasiones, a esta reacción se le conoce como auto ionización del agua (Chang, 2001).

### 3.2 El producto iónico del agua

En el estudio de las reacciones ácido-base, la concentración del ion hidrógeno es muy importante, ya que indica la acidez o basicidad de una disolución. Ya que sólo una fracción muy pequeña de moléculas del agua se ioniza, la concentración del agua,  $[H_2O]$ , permanece virtualmente sin cambios. Por consiguiente, la constante de equilibrio para la auto ionización del agua es:

$$K_c = [H_3O^+][OH^-]$$

Para indicar que la constante de equilibrio se refiere a la auto ionización del agua, se reemplaza  $K_c$  con  $K_w$

$$K_w = [H^+][OH^-]$$

Independientemente de que se trate de agua pura o de una disolución acuosa de especies disueltas, la siguiente relación siempre se cumple a 25°C (Chang, 2001):

$$K_w = [H^+][OH^-] = 1.0 * 10^{-14}$$

### 3.3 El pH: una medida de la acidez

Puesto que las concentraciones de los iones  $H^+$  y  $OH^-$  en disoluciones acuosas con frecuencia son números muy pequeños y, por tanto, es difícil trabajar con ellos, Soren Sorensen propuso, en 1909, una medida más práctica denominada pH. El pH de una disolución se define como

el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno (en mol/L):

$$pH = -\log[H^+]$$

Debido a que el pH sólo es una manera de expresar la concentración del ion hidrógeno, las disoluciones ácidas y básicas a 25°C se identifican por sus valores del pH, como sigue:

Disoluciones ácidas:

$$[H^+] > 1.0 \times 10^{-7} \text{M}, \text{pH} < 7.00$$

Disoluciones básicas:

$$[H^+] < 1.0 \times 10^{-7} \text{M}, \text{pH} > 7.00$$

Disoluciones neutras:

$$[H^+] = 1.0 \times 10^{-7} \text{M}, \text{pH} = 7.00$$

Observe que el pH aumenta a medida que el  $[H^+]$  disminuye. Es probable que algunas veces se nos proporcione el valor del pH de una disolución y se nos pida calcular la concentración del ion  $[H^+]$ . En ese caso, necesitamos obtener el antilogaritmo como sigue (Chang, 2001):

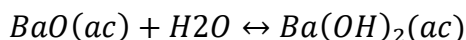
$$[H^+] = 10^{-pH}$$

### **3.4 Propiedades ácido-base de los óxidos y los hidróxidos**

Los óxidos se clasifican como ácidos, básicos o anfóteros. Todos los óxidos de los metales alcalinos y alcalinotérreos, con excepción del BeO, son básicos. El óxido de berilio y algunos óxidos metálicos de los

grupos 3A y 4A son anfóteros. Los óxidos no metálicos de los elementos representativos con número de oxidación alto son ácidos (por ejemplo,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{SO}_3$  y  $\text{Cl}_2\text{O}_7$ ), pero los óxidos de estos mismos elementos representativos con número de oxidación bajo (por ejemplo,  $\text{CO}$  y  $\text{NO}$ ) no muestran propiedades ácidas cuantificables. No se conocen óxidos no metálicos que tengan propiedades básicas (Chang, 2001).

Los óxidos metálicos básicos reaccionan con el agua para formar hidróxidos metálicos:



### 3.5 Ácidos y bases de Lewis

En 1932, el químico norteamericano G. N. Lewis formuló una definición. Postuló lo que actualmente se denomina una base de Lewis como una sustancia que puede donar un par de electrones. Un ácido de Lewis es una sustancia capaz de aceptar un par de electrones. Por ejemplo, en la protonación del amoníaco, el  $\text{NH}_3$  actúa como una base de Lewis porque dona un par de electrones al protón  $\text{H}^+$ , que a su vez actúa como un ácido de Lewis porque acepta el par de electrones. Por tanto, una reacción ácido-base de Lewis es aquella que implica la donación de un par de electrones de una especie a otra. Dicha reacción no produce una sal y agua (Chang, 2001).

### 3.6 Los equilibrios de iones complejos y la solubilidad

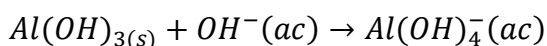
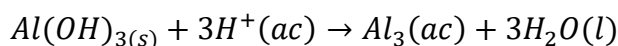
Las reacciones entre ácidos y bases de Lewis, en las que se combina un catión metálico con una base de Lewis, llevan a formar iones complejos.

Así, un ion complejo se define como un ion que contiene un catión metálico central enlazado a una o más moléculas o iones. Los iones complejos son fundamentales para muchos procesos químicos y biológicos (Chang, 2001).

Los metales de transición tienen una tendencia particular a formar iones complejos porque poseen más de un estado de oxidación. Esta propiedad les permite comportarse en forma efectiva como ácidos de Lewis, cuando reaccionan con varios tipos de moléculas o iones que sirven como donadores de electrones, o bases de Lewis.

Una medida de la tendencia de un ion metálico a formar un ion complejo particular está dada por la constante de formación  $K_f$  (también conocida como constante de estabilidad), que es la constante de equilibrio de la formación del ion complejo. Cuanto mayor sea el valor de  $K_f$ , más estable es el ion complejo (Chang, 2001).

Hay un tipo de hidróxidos, conocidos como hidróxidos anfóteros, que reaccionan tanto con ácidos como con bases. Entre éstos figuran  $Al(OH)_3$ ,  **$Pb(OH)_2$** ,  $Cr(OH)_3$ ,  $Zn(OH)_2$  y  $Cd(OH)_2$ . Por ejemplo, el  $Al(OH)_3$  reacciona con ácidos y bases de la siguiente manera:



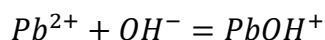
El aumento en la solubilidad de  $Al(OH)_{3(s)}$  en un medio básico obedece a la formación del ion complejo  $Al(OH)_4^-$ , donde  $Al(OH)_{3(s)}$  actúa como ácido de Lewis y  $OH^-$  como base de Lewis. Otros hidróxidos

anfóteros se comportan de manera semejante.

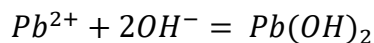
### 3.7 Equilibrio y Solubilidad del Plomo Pb

Wang, C *et. al.* (2009) mencionan seis tipos de complejos hidroxilos del ión plomo en aguas residuales

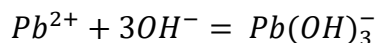
(  $PbOH^+$ ,  $Pb(OH)_2$ ,  $Pb(OH)_3^-$ ,  $Pb_2(OH)^{3+}$ ,  $Pb_4(OH)_4^{4+}$ ,  $Pb_6(OH)_8^{4+}$ ), e indica sus constantes de formación a 298 °K , los cuales son:



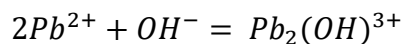
$$K_1 = \frac{[PbOH^+]}{[Pb^{2+}][OH^-]} = 10^{6.2} \quad Ec. 1$$



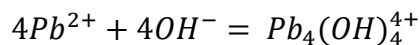
$$K_2 = \frac{[Pb(OH)_2]}{[Pb^{2+}][OH^-]^2} = 10^{10.3} \quad Ec. 2$$



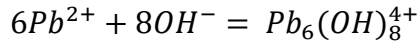
$$K_3 = \frac{[Pb(OH)_3^-]}{[Pb^{2+}][OH^-]^3} = 10^{13.3} \quad Ec. 3$$



$$K_4 = \frac{[Pb_2(OH)^{3+}]}{[Pb^{2+}]^2[OH^-]} = 10^{7.6} \quad Ec. 4$$

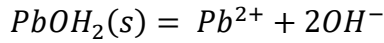


$$K_5 = \frac{[Pb_4(OH)_4^{4+}]}{[Pb^{2+}]^4[OH^-]^4} = 10^{36.1} \quad Ec. 5$$



$$K_6 = \frac{[Pb_6(OH)_8^{4+}]}{[Pb^{2+}]^6[OH^{-}]^8} = 10^{69.3} \quad Ec. 6$$

Se sabe que:



$$K_{so} = \frac{[Pb^{2+}][OH^{-}]^2}{[Pb(OH)_2(s)]} = 1.2 * 10^{-15}$$

Pero  $[Pb(OH)_2(s)] = 1$  por ser un sólido entonces:

$$K_{so} = [Pb^{2+}][OH^{-}]^2 = 1.2 * 10^{-15}$$

Si despejamos  $[Pb^{2+}]$

$$[Pb^{2+}] = \frac{1.2 * 10^{-15}}{[OH]^{-2}} \quad Ec. 7$$

Reemplazando Ec7 en Ec1:

$$K_1 = \frac{[PbOH^{+}]}{[Pb^{2+}][OH^{-}]} = 10^{6.2} = \frac{[PbOH^{+}]}{\frac{1.2 * 10^{-15}}{[OH]^{-2}} * [OH]}$$

$$[PbOH^{+}][OH] = 1.901 * 10^{-9} \quad Ec. 8$$

Si conocemos la auto disociación del agua:

$$K_w = [H^{+}][OH^{-}] = 10^{-14} \quad Ec. 9$$

Reemplazo Ec.9 en Ec.8:

$$\frac{[PbOH^+][10^{-14}]}{[H^+]} = 1.901 * 10^{-9}$$

$$\frac{[PbOH^+]}{[H^+]} = 1.901 * 10^5$$

Aplicando Log base 10:

$$\log\left(\frac{[PbOH^+]}{[H^+]}\right) = \log 1.901 * 10^5$$

$$\log[PbOH^+] - \log[H^+] = \log 1.901 * 10^5$$

$$\log[PbOH^+] = 5.27 + \log[H^+]$$

$$\mathbf{p[PbOH^+] = -5.27 + pH} \qquad \mathbf{Ec. 10}$$

O también se expresa como:

$$\mathbf{\log[PbOH^+] = 5.27 - pH}$$

Esta ecuación rige la concentración del  $[PbOH^+]$  a diferentes  $pH$  en una solución acuosa en el estado de equilibrio a 298 °K, y se procede a graficar en un diagrama pc-pH o logc-Ph.

Realizando este mismo proceso para reemplazar las ecuaciones 7 y 9 en las ecuaciones 2, 3, 4, 5 y 6, se tiene las siguientes ecuaciones:

Reemplazando las ecuaciones 7 y 9 en 2 tenemos:

$$\mathbf{p[Pb(OH)_2] = 4.621} \qquad \mathbf{Ec. 11}$$

O también se expresa como:

$$\log[\text{Pb}(\text{OH})_2] = -4.621$$

Reemplazando las ecuaciones 7 y 9 en 3 tenemos:

$$p[\text{Pb}(\text{OH})_3^-] = 15.618 - pH \quad \text{Ec. 12}$$

$$\log[\text{Pb}(\text{OH})_3^-] = -15.618 + pH$$

Reemplazando las ecuaciones 7 y 9 en 4 tenemos:

$$p[\text{Pb}_2(\text{OH})^{3+}] = -19.749 + 3pH \quad \text{Ec. 13}$$

$$\log[\text{Pb}_2(\text{OH})^{3+}] = 19.749 - 3pH$$

Reemplazando las ecuaciones 7 y 9 en 5 tenemos:

$$p[\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}] = -32.405 + 4pH \quad \text{Ec. 14}$$

$$\log[\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}] = 32.405 - 4pH$$

Reemplazando las ecuaciones 7 y 9 en 6 tenemos:

$$p[\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}] = -35.763 + 4pH \quad \text{Ec. 15}$$

$$\log[\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}] = 35.763 - 4pH$$

Finalmente, para concluir con nuestro diagrama podemos obtener la curva del  $[\text{Pb}^{2+}]$ , de la ecuación 7 en la cual reemplazamos la ecuación 9.

$$[Pb^{2+}] = \frac{1.2 * 10^{-15}}{\left[\frac{10^{-14}}{H^+}\right]^2}$$

$$[Pb^{2+}] = 1.2 * 10^{13}[H^-]^2$$

$$\log[Pb^{2+}] = \log(1.2 * 10^{13}[H^-]^2)$$

$$\log[Pb^{2+}] = \log(1.2 * 10^{13}) + \log[H^-]^2$$

$$\log[Pb^{2+}] = 13.079 + 2\log[H^-]$$

$$p[Pb^{2+}] = -13.079 + 2pH \quad \text{Ec. 16}$$

$$\log[Pb^{2+}] = 13.079 - 2pH$$

Se realiza el gráfico pc-pH de las ecuaciones 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16.



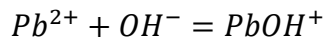
Figura 7. Diagrama logC- pH del sistema  $Pb_2 + H_2O$  a 298 °K.

Las líneas en la Figura 7 representan la relación entre la concentración de equilibrio de las especies y el valor de pH. El área superior derecha rodeada por estas líneas (por ejemplo, el área de sombreado transversal) es la zona estable de  $Pb(OH)_2(s)$ .

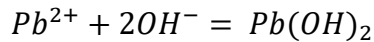
La Figura 7, ilustra que  $[Pb^{2+}]$  es la especie soluble predominante en el bajo pH, y el  $[Pb_6(OH)_8^{4+}]$  es la especie predominante en el pH alto.

### 3.8 Diagrama de distribución de especies (diagrama alfa) en todo el rango de Ph

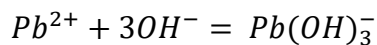
De la Tabla 7, obtenemos las constantes de estabilidad para la complejación de los metales por  $[OH^-]$  que corresponden a las ecuaciones 1,2 y 3 de este trabajo:



$$K_1 = \frac{[PbOH^+]}{[Pb^{2+}][OH^-]} = 10^{6.2} \quad Ec. 1$$

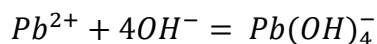


$$K_2 = \frac{[Pb(OH)_2]}{[Pb^{2+}][OH^-]^2} = 10^{10.3} \quad Ec. 2$$



$$K_3 = \frac{[Pb(OH)_3^-]}{[Pb^{2+}][OH^-]^3} = 10^{13.3} \quad Ec. 3$$

Y aumentamos la solubilidad para  $4OH^-$  y obtenemos la ecuación 17:



$$K_4 = \frac{[Pb(OH)_4^-]}{[Pb^{2+}][OH^-]^4} = 10^{16.3} \quad Ec. 17$$

El balance de masa para el plomo en solución es:

$$[Pb]_T = [Pb^{2+}] + [PbOH^+] + [Pb(OH)_2] + [Pb(OH)_3^-] + [Pb(OH)_4^-] \quad Ec. 18$$

Por definición de  $\alpha$ , sabemos que:

$$\alpha_0 = \frac{[Pb^{2+}]}{[Pb]_T} \quad Ec. 19$$

$$\alpha_1 = \frac{[Pb(OH)^-]}{[Pb]_T} \quad Ec. 20$$

$$\alpha_2 = \frac{[Pb(OH)_2]}{[Pb]_T} \quad Ec. 21$$

$$\alpha_3 = \frac{[Pb(OH)_3^-]}{[Pb]_T} \quad Ec. 22$$

$$\alpha_4 = \frac{[Pb(OH)_4^-]}{[Pb]_T} \quad Ec. 23$$

Para hallar  $\alpha_1$ :

Sabemos que de la ecuación 1:

$$K_1 = \frac{[PbOH^+]}{[Pb^{2+}][OH^-]} = 10^{6.2}$$

$$K_1[OH^-][Pb^{2+}] = [PbOH^+] \quad Ec. 24$$

Sabemos que de la ecuación 19:

$$\alpha_0 = \frac{[Pb^{2+}]}{[Pb]_T}$$

$$[Pb^{2+}] = [Pb]_T \alpha_0 \quad \text{Ec. 25}$$

Ahora Reemplazamos la Ec. 24 y Ec. 25 en Ec. 20:

$$\alpha_1 = \frac{K_1[OH^-][Pb^{2+}]}{[Pb]_T}$$

$$\alpha_1 = \frac{K_1[OH^-][Pb]_T \alpha_0}{[Pb]_T}$$

$$\alpha_1 = K_1[OH^-] \alpha_0$$

Ahora reemplazamos la Ec. 9 disociación del agua:

$$\alpha_1 = \frac{K_1 K_w \alpha_0}{[H^+]} \quad \text{Ec. 26}$$

Para hallar  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \frac{[Pb(OH)_2]}{[Pb]_T}$$

Sabemos que de la ecuación 2:

$$K_2[Pb^{2+}][OH^-]^2 = [Pb(OH)_2] \quad \text{Ec. 27}$$

Ahora Reemplazamos la Ec. 25 y Ec. 27 en Ec. 21:

$$\alpha_2 = \frac{[Pb(OH)_2]}{[Pb]_T}$$

$$\alpha_2 = \frac{K_2 [Pb]_T \alpha_0 [OH^-]^2}{[Pb]_T}$$

$$\alpha_2 = K_2 \alpha_0 [OH^-]^2$$

Ahora reemplazamos la Ec. 9 disociación del agua:

$$\alpha_2 = \frac{K_2 \alpha_0 K_w^2}{[H^+]^2} \quad \text{Ec. 28}$$

Para hallar  $\alpha_3$ :

$$\alpha_3 = \frac{[Pb(OH)_3^-]}{[Pb]_T}$$

Sabemos que de la ecuación 3:

$$K_3 [Pb^{2+}] [OH^-]^3 = [Pb(OH)_3^-] \quad \text{Ec. 29}$$

Ahora Reemplazamos la Ec. 29 y Ec. 25 en Ec. 22:

$$\alpha_3 = \frac{K_3 [Pb]_T \alpha_0 [OH^-]^3}{[Pb]_T}$$

$$\alpha_3 = K_3 \alpha_0 [OH^-]^3$$

Ahora reemplazamos la Ec. 9 disociación del agua:

$$\alpha_3 = \frac{K_3 \alpha_0 [K_w]^3}{[H^+]^3} \quad \text{Ec. 30}$$

Para hallar  $\alpha_4$ :

$$\alpha_4 = \frac{[Pb(OH)_4^-]}{[Pb]_T}$$

Sabemos que de la ecuación 17:

$$[Pb(OH)_4^-] = K_4 [Pb^{2+}] [OH^-]^4 \quad \text{Ec. 31}$$

Ahora Reemplazamos la Ec. 31 y Ec. 25 en Ec. 23:

$$\alpha_4 = \frac{K_4 [Pb]_T \alpha_0 [OH^-]^4}{[Pb]_T}$$

$$\alpha_4 = K_4 \alpha_0 [OH^-]^4$$

Ahora reemplazamos la Ec. 9 disociación del agua:

$$\alpha_4 = \frac{K_4 \alpha_0 K_w^4}{[H^+]^4} \quad \text{Ec. 32}$$

Para hallar  $\alpha_0$ :

Sabemos que:

$$\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1 \quad \text{Ec. 33}$$

Reemplazamos las ecuaciones 26, 28, 30 y 32 en la ecuación 33:

$$\begin{aligned} \alpha_0 + \frac{K_1 K_w \alpha_0}{[H^+]} + \frac{K_2 \alpha_0 K_w^2}{[H^+]^2} + \frac{K_3 \alpha_0 [K_w]^3}{[H^+]^3} + \frac{K_4 \alpha_0 K_w^4}{[H^+]^4} \\ = 1 \end{aligned}$$

$$\alpha_0 + \alpha_0 \left( \frac{K_1 Kw}{[H^+]} + \frac{K_2 Kw^2}{[H^+]^2} + \frac{K_3 [Kw]^3}{[H^+]^3} + \frac{K_4 Kw^4}{[H^+]^4} \right) = 1$$

$$\alpha_0 \left\{ 1 + \left( \frac{K_1 Kw}{[H^+]} + \frac{K_2 Kw^2}{[H^+]^2} + \frac{K_3 [Kw]^3}{[H^+]^3} + \frac{K_4 Kw^4}{[H^+]^4} \right) \right\} = 1$$

$$\alpha_0 \left\{ 1 + \left( \frac{K_1 Kw [H^+]^3 + K_2 Kw^2 [H^+]^2 + K_3 [Kw]^3 [H^+] + K_4 Kw^4}{[H^+]^4} \right) \right\} = 1$$

$$\alpha_0 \left\{ \frac{[H^+]^4 + K_1 Kw [H^+]^3 + K_2 Kw^2 [H^+]^2 + K_3 [Kw]^3 [H^+] + K_4 Kw^4}{[H^+]^4} \right\}$$

$$= 1$$

$$\alpha_0$$

$$= \frac{[H^+]^4}{[H^+]^4 + K_1 Kw [H^+]^3 + K_2 Kw^2 [H^+]^2 + K_3 [Kw]^3 [H^+] + K_4 Kw^4} \quad \text{Ec. 34}$$

Para obtener el grafico del efecto del pH en las especies del plomo de grafica  $\alpha$  vs.  $pH$ , a continuación, con las ecuaciones 26, 28, 30, 32 y 34, se obtienen el valor de las actividades y con estos se construyen el diagrama.

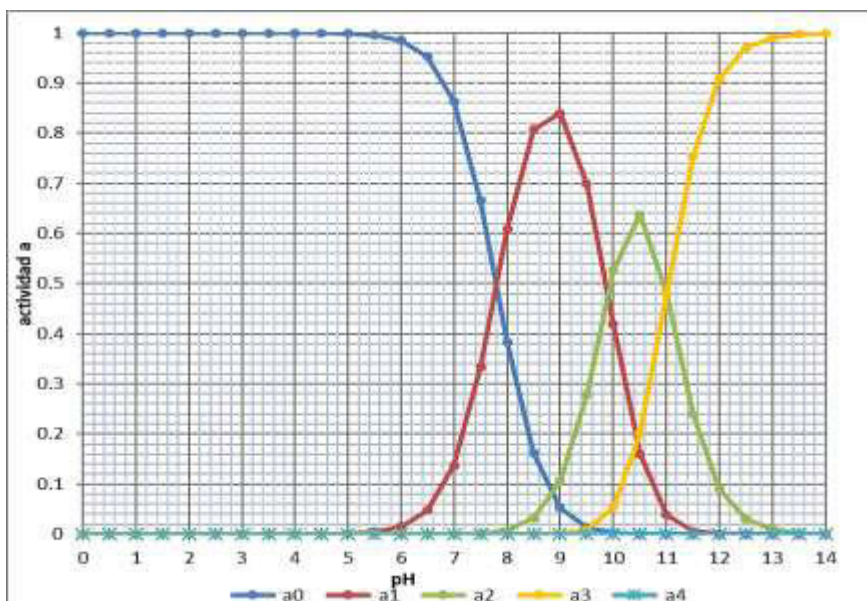
**Tabla 7. Valores calculados a partir de las ecuaciones 26, 28, 30, 32 y 34.**

N <sup>o</sup>	pH	H <sup>+</sup>	┐┐0	┐┐1	┐┐2	┐┐3	┐┐┐	Suma
1	0.0	1.00E+00	1.00E+00	1.58E-08	2.00E-18	1.99E-29	3.98E-49	1.00E+00
2	0.5	3.16E-01	1.00E+00	5.01E-08	2.00E-17	6.31E-28	3.98E-47	1.00E+00
3	1.0	1.00E-01	1.00E+00	1.58E-07	2.00E-16	1.99E-26	3.98E-45	1.00E+00
4	1.5	3.16E-02	1.00E+00	5.01E-07	2.00E-15	6.31E-25	3.98E-43	1.00E+00
5	2.0	1.00E-02	1.00E+00	1.58E-06	2.00E-14	1.99E-23	3.98E-41	1.00E+00
6	2.5	3.16E-03	1.00E+00	5.01E-06	2.00E-13	6.31E-22	3.98E-39	1.00E+00
7	3.0	1.00E-03	1.00E+00	1.58E-05	2.00E-12	1.99E-20	3.98E-37	1.00E+00
8	3.5	3.16E-04	1.00E+00	5.01E-05	2.00E-11	6.31E-19	3.98E-35	1.00E+00
9	4.0	1.00E-04	1.00E+00	1.58E-04	1.99E-10	1.99E-17	3.98E-33	1.00E+00
10	4.5	3.16E-05	9.99E-01	5.01E-04	1.99E-09	6.31E-16	3.98E-31	1.00E+00

N <sub>o</sub>	pH	H <sup>+</sup>	┐┐0	┐┐1	┐┐2	┐┐3	┐┐┐	Suma
11	5.0	1.00E-05	9.98E-01	1.58E-03	1.99E-08	1.99E-14	3.97E-29	1.00E+00
12	5.5	3.16E-06	9.95E-01	4.99E-03	1.99E-07	6.28E-13	3.96E-27	1.00E+00
13	6.0	1.00E-06	9.84E-01	1.56E-02	1.96E-06	1.96E-11	3.92E-25	1.00E+00
14	6.5	3.16E-07	9.52E-01	4.77E-02	1.90E-05	6.01E-10	3.79E-23	1.00E+00
15	7.0	1.00E-07	8.63E-01	1.37E-01	1.72E-04	1.72E-08	3.44E-21	1.00E+00
16	7.5	3.16E-08	6.65E-01	3.33E-01	1.33E-03	4.20E-07	2.65E-19	1.00E+00
17	8.0	1.00E-08	3.84E-01	6.08E-01	7.66E-03	7.66E-06	1.53E-17	1.00E+00
18	8.5	3.16E-09	1.61E-01	8.07E-01	3.21E-02	1.02E-04	6.41E-16	1.00E+00
19	9.0	1.00E-09	5.30E-02	8.40E-01	1.06E-01	1.06E-03	2.11E-14	1.00E+00
20	9.5	3.16E-10	1.39E-02	6.99E-01	2.78E-01	8.80E-03	5.55E-13	1.00E+00

N <sup>o</sup>	pH	H <sup>+</sup>	a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	Suma
21	10.0	1.00E-10	2.64E-03	4.18E-01	5.27E-01	5.26E-02	1.05E-11	1.00E+00
22	10.5	3.16E-11	3.20E-04	1.60E-01	6.38E-01	2.02E-01	1.27E-10	1.00E+00
23	11.0	1.00E-11	2.41E-05	3.82E-02	4.81E-01	4.81E-01	9.60E-10	1.00E+00
24	11.5	3.16E-12	1.20E-06	6.00E-03	2.39E-01	7.55E-01	4.77E-09	1.00E+00
25	12.0	1.00E-12	4.55E-08	7.22E-04	9.09E-02	9.08E-01	1.81E-08	1.00E+00
26	12.5	3.16E-13	1.54E-09	7.70E-05	3.07E-02	9.69E-01	6.12E-08	1.00E+00
27	13.0	1.00E-13	4.96E-11	7.87E-06	9.90E-03	9.90E-01	1.98E-07	1.00E+00
28	13.5	3.16E-14	1.58E-12	7.92E-07	3.15E-03	9.97E-01	6.29E-07	1.00E+00
29	14.0	1.00E-14	5.01E-14	7.94E-08	9.99E-04	9.99E-01	1.99E-06	1.00E+00

A partir de estos valores se obtiene el siguiente grafico para la especie  $[Pb^{2+}]$  representado por a<sub>0</sub>, especie  $[PbOH^-]$  representado por a<sub>1</sub>, especie  $[Pb(OH)_2]$  representado por a<sub>2</sub>, especie  $[Pb(OH)_3^-]$  representado por a<sub>3</sub> y la especie  $[Pb(OH)_4^-]$  representado por a<sub>4</sub>.



**Figura 8.** Diagrama de distribución de especies de hidróxido de plomo en función del pH.

En el gráfico podemos observar que la especie  $[Pb^{2+}]$  a pH = 5 empieza a reaccionar a favor de la especie  $[PbOH^-]$  la que tiene una actividad máxima a pH = 9 en la que empieza a decrecer a favor de una nueva especie que empezó a formarse a pH = 8 y tiene su máxima actividad a pH = 10.5 en el que decrece su formación a favor de la especie  $[Pb(OH)_3^-]$  que empezó su formación a pH= 9 y es la especie con la más alta actividad de formación. La especie  $[Pb(OH)_4^-]$  tiene una actividad muy ínfima y no es representativa respecto a las demás.

En conclusión, podemos indicar que a pH < 5 la concentración de  $[Pb^{2+}]$  es dominante y las especie  $[PbOH^-]$  y  $[Pb(OH)_2]$  es la de más fácil formación a condiciones normales y si el medio acuoso es básico, la especie  $[Pb(OH)_3^-]$  es la dominante

## CAPÍTULO IV

### 4 QUÍMICA DE COORDINACIÓN (O COMPLEJACIÓN) Y/O QUÍMICA DE PRECIPITACIÓN / DISOLUCIÓN

#### 4.1 Complejación

Los ligandos son muy diversos, pero todos incluyen un átomo electronegativo que tiene uno o más pares de electrones disponibles para formar enlaces con iones metálicos. Los tipos de ligandos incluyen aniones monoatómicos simples (por ejemplo:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ), iones inorgánicos multiatómicos (por ejemplo:  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CN}^-$ ), moléculas neutras (por ejemplo:  $\text{NH}_3$ ) y bases y aniones orgánicos (por ejemplo: aminas y aniones de ácido carboxílico).

Una reciente revisión y análisis de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC, por sus siglas en inglés) de la complejación de  $\text{Pb(II)}$  por ligandos inorgánicos muestra una especiación química de metales ambientalmente significativos con ligandos inorgánicos en sistema de  $\text{Pb}^{2+}$  con  $\text{OH}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{PO}_4^{2-}$ . (Culkin, 1965).

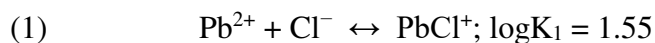
##### *4.1.1 Complejación del plomo por cloruro*

La especiación química inorgánica de metales traza en el agua de mar (y en muchas aguas dulces) es simple de realizar los cálculos, si podemos asumir que la complejación de los iones metálicos por la materia orgánica natural y los ligandos orgánicos traza de origen humano no es importante. Debido a que las concentraciones de iones metálicos son bajas (a menudo  $\ll 10^{-6}$  M), la complejación no afecta a

las concentraciones de los ligandos aniónicos inorgánicos, que típicamente ocurren a concentraciones de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}$  M en aguas dulces (y  $10^{-4}$  a  $10^{-1}$  M en agua de mar). Esto limita los problemas lo suficiente como para permitir la solución de las ecuaciones de especiación. A continuación, se desarrolla tres ejemplos de la especiación de plomo en el agua de mar que involucran secuencialmente un número creciente de ligandos potenciales:

#### ***4.1.2 Abundancia del complejo monoclora-plomo (II) en el agua de mar.***

El plomo existe en aguas naturales principalmente como Pb(II). Su concentración total en las capas superficiales de los océanos del mundo es  $Pb_T = 14 \text{ ng kg}^{-1}$  ( $\sim 14 \text{ ng/L}$ , o  $7 \times 10^{-11} \text{ M}$ ). Para calcular la especiación en agua de mar que encuentra dominado por cloruro, porque la concentración de  $Cl^-$  en el agua de mar es muy alta (0.546 M). Se calcula la fracción de Pb(II) complejada con cloruro en agua de mar e inicialmente encuentra un valor constante de estabilidad para el complejo monoclora-plomo:



Pensando erróneamente que estas son las únicas especies que deben considerarse, calculó la distribución de Pb(II) entre  $Pb^{2+}$  y  $PbCl^+$  de la siguiente manera. Primero, corrigió la constante de estabilidad a una constante basada en la concentración al calcular los coeficientes de actividad para la especie en la ecuación (1) utilizando la ecuación de Davies. A la fuerza iónica del agua de mar ( $I = 0.699$ ), encontró  $\gamma = 0.69$  para iones monovalentes e  $\gamma = 0.23$  para iones divalentes. Usando estos

valores, se calcula ese registro  $cK1 = 0.912$  y procede a resolver el problema:

$$(2) \quad cK1 = 100.912 = \frac{[PbCl^+]}{[Pb^{2+}][Cl^-]} = \frac{[PbCl^+]}{[Pb^{2+}] \times 0.546}$$

Así,

$$(3) \quad 4.459 = \frac{[PbCl^+]}{[Pb^{2+}]} \quad \text{ó} \quad [PbCl^+] = 4.459 [Pb^{2+}]$$

La expresión de balance de masa para el plomo en agua de mar y se sustituye la ecuación. (3) en él:

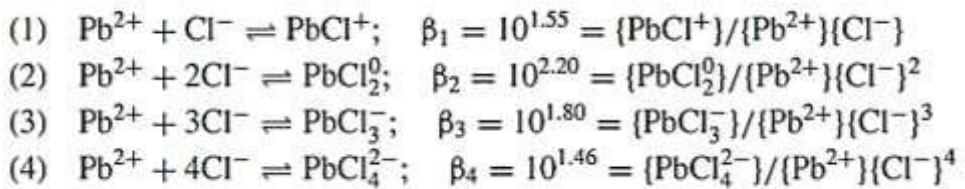
$$(4) \quad Pb_T = 7.0 \times 10^{-11} = [Pb^{2+}] + [PbCl^+] = [Pb^{2+}] + 4.459 [Pb^{2+}]$$

Resolviendo para  $[Pb^{2+}]$ , se encontró  $[Pb^{2+}] = 1.28 \times 10^{-11}$ , y por diferencia encontró  $[PbCl^+] = 5.72 \times 10^{-11}$ .

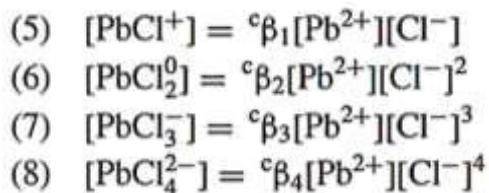
Sobre la base de estos cálculos, concluye que el 82% de la Pb(II) en el agua de mar existe como el monocloro-complejo.

#### **4.1.3 4.1.4 Abundancia de clorocomplejos de PbII en el agua de mar:**

De acuerdo a los resultados anteriores, el Pb(II) puede formar más de un complejo con  $Cl^-$  y se puede desarrollar más sobre las constantes de estabilidad de estos complejos. Se desarrolla una tabulación de valores constantes de estabilidad que Pb(II) puede formar cuatro complejos con  $Cl^-$ :



Luego procede a corregir los valores de las constantes basadas en la concentración utilizando los coeficientes de actividad que calculó en el ejemplo anterior utilizando la ecuación de Davies. Encontró  $c\beta_1 = 10^{0.912}$ ,  $c\beta_2 = 10^{1.168}$ ,  $c\beta_3 = 10^{0.839}$ ,  $c\beta_4 = 10^{0.816}$ . Luego, se señala que todas las ecuaciones se pueden resolver para la concentración del complejo respectivo en términos de concentración de plomo libre (II),  $[\text{Pb}^{2+}]$



Escribió la ecuación de balance de masa para  $\text{Pb}_T$  y procedió a sustituir las ecuaciones. (5) y (8) en él para las concentraciones de los cuatro complejos de cloro:

$$(9) \quad \text{Pb}_T = 7 \times 10^{-11} = [\text{Pb}^{2+}] + [\text{PbCl}^+] + [\text{PbCl}_2^0] + [\text{PbCl}_3^-] + [\text{PbCl}_4^{2-}]$$

y

$$(10) \quad \text{Pb}_T = 7 \times 10^{-11} = [\text{Pb}^{2+}] + c\beta_1 [\text{Pb}^{2+}][\text{Cl}^-] + c\beta_2 [\text{Pb}^{2+}][\text{Cl}^-]^2 + c\beta_3 [\text{Pb}^{2+}][\text{Cl}^-]^3 + c\beta_4 [\text{Pb}^{2+}][\text{Cl}^-]^4$$

ó

$$(11) \quad \text{Pb}_T = 7 \times 10^{-11} = [\text{Pb}^{2+}] (1 + c\beta_1 [\text{Cl}^-] + c\beta_2 [\text{Cl}^-]^2 + c\beta_3 [\text{Cl}^-]^3 + c\beta_4 [\text{Cl}^-]^4).$$

Sustituyendo en valores para  $[\text{Cl}^-]$  y los  $c\beta$ s, se obtiene:

$$(12) \quad \text{Pb}_T = 7 \times 10^{-11} = [\text{Pb}^{2+}] (1 + 4.459 + 4.389 + 1.123 + 0.582) = 11.553 [\text{Pb}^{2+}].$$

Por lo tanto,  $[\text{Pb}^{2+}] = 6.02 \times 10^{-12}$ . Luego se multiplica este valor por cada uno de los términos entre paréntesis en la ecuación. (12) Para obtener concentraciones de los diversos complejos de cloro.

$$[\text{PbCl}^+] = 6.02 \times 10^{-12} \times 4.459 = 2.702 \times 10^{-11} \text{ M};$$

$$[\text{PbCl}^0_2] = 6.02 \times 10^{-12} \times 4.389 = 2.66 \times 10^{-11} \text{ M};$$

$$[\text{PbCl}^-_3] = 6.02 \times 10^{-12} \times 1.123 = 6.81 \times 10^{-12} \text{ M};$$

$$[\text{PbCl}^{2-}_4] = 6.02 \times 10^{-12} \times 0.582 = 3.53 \times 10^{-12} \text{ M}$$

Como una comprobación de los cálculos, se agrega las concentraciones de estos cuatro complejos más la de  $\text{Pb}^{2+}$  libre y se encuentra un valor de  $7.00 \times 10^{-11}$ , que concuerda con el valor reportado de  $\text{Pb}_T$ .

#### **4.1.4 Complejación del Plomo por otros iones**

Los resultados de los anteriores cálculos para los complejos de plomo en el agua de mar (en el Ítem 5.1.1). Mediante la base de datos termodinámica en MINEQL+ y se puede encontrar constantes para complejos de plomo con  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_2^{-4}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  y  $\text{F}^-$ , así como los

valores de los complejos de hidróxido formados por las reacciones de hidrólisis de  $Pb^{2+}$ .

Se encontraron constantes de estabilidad para 19 complejos. Si se aplica el mismo enfoque que usó en el ejemplo anterior. Para facilitar el trabajo con la gran cantidad de reacciones y constantes, se puede hacer una tabulación (Tabla 8) con la reacción de formación listada en la primera columna y la constante de estabilidad correspondiente en  $I = 0$  en la siguiente columna. Usando los coeficientes de actividad calculados a partir de la ecuación de Davies, se corrige las constantes a valores basados en la concentración (columna 3 de la Tabla 8). Usando datos de la literatura de química marina (Culkin, 1965) (Stumm & Morgan, 1996) para las concentraciones de aniones en el agua de mar (Tabla 8), calculó los valores de  $c\beta_n [L]^n$  (columna cuatro de la Tabla 8) de una manera comparable a los términos entre paréntesis de las ecuaciones. (11) y (12) en el cálculo anterior. Sumando estos términos, se puede encontrar:

$$(2) \quad Pb_T = [Pb^{2+}] (1 + \sum c\beta_n [L]^n) = 7 \times 10^{-11} = [Pb^{2+}](1 + 13.205),$$

o  $[Pb^{2+}] = 4.93 \times 10^{-12}$ . Al multiplicar todos los términos en la columna cuatro de la Tabla 8 por este valor, se obtienen las concentraciones de todos los complejos tabulados en la columna final. De la Tabla 8 se desprende que no todos los 19 complejos son importantes en la especiación de Pb (II) en el agua de mar.

Tabla 8. Especiación de plomo (II) en agua de mar.

	$\text{Log } \beta_i$	$\text{Log } {}^c\beta_i$	${}^c\beta_n [L]^n$	$[PbL_n^{2-n}]$		
<i>A. Reaction</i>						
$Pb^{2+} + Cl^- = PbCl^+$	1.55	0.912	4.459	$2.20 \times 10^{-11}$		
$Pb^{2+} + 2Cl^- = PbCl_2^0$	2.20	1.168	4.389	$2.16 \times 10^{-11}$		
$Pb^{2+} + 3Cl^- = PbCl_3^-$	1.80	0.839	1.123	$5.54 \times 10^{-12}$		
$Pb^{2+} + 4Cl^- = PbCl_4^{2-}$	1.46	0.816	0.582	$2.86 \times 10^{-12}$		
$Pb^{2+} + F^- = PbF^+$	1.848	1.210	$1.1 \times 10^{-3}$	$5.42 \times 10^{-15}$		
$Pb^{2+} + 2F^- = PbF_2^0$	3.142	2.181	$7.0 \times 10^{-7}$	$3.45 \times 10^{-18}$		
$Pb^{2+} + 3F^- = PbF_3^-$	3.42	2.459	$9.0 \times 10^{-11}$	$4.44 \times 10^{-22}$		
$Pb^{2+} + 4F^- = PbF_4^{2-}$	3.10	2.456	$6.1 \times 10^{-15}$	$3.00 \times 10^{-26}$		
$Pb^{2+} + Br^- = PbBr^+$	1.70	1.061	$9.7 \times 10^{-3}$	$4.78 \times 10^{-14}$		
$Pb^{2+} + 2Br^- = PbBr_2^0$	2.60	1.639	$3.1 \times 10^{-5}$	$1.53 \times 10^{-16}$		
$Pb^{2+} + CO_3^{2-} = PbCO_3^0$	6.478	5.201	0.370	$1.82 \times 10^{-12}$		
$Pb^{2+} + 2CO_3^{2-} = Pb(CO_3)_2^{2-}$	9.938	8.661	$2.5 \times 10^{-3}$	$1.23 \times 10^{-14}$		
$Pb^{2+} + SO_4^{2-} = PbSO_4^0$	2.69	1.413	0.730	$3.55 \times 10^{-12}$		
$Pb^{2+} + 2SO_4^{2-} = Pb(SO_4)_2^{2-}$	3.47	2.193	0.124	$6.11 \times 10^{-13}$		
$Pb^{2+} + H^+ + CO_3^{2-} = PbHCO_3^+$	13.20	12.562	0.078*	$3.85 \times 10^{-13}$		
	$\text{log}^*\beta_i$	$\text{log}^{c*}\beta$	${}^{c*}\beta_n/[H^+]^n$			
$Pb^{2+} + H_2O = PbOH^+ + H^+$	-7.597	-7.913	1.337	$6.59 \times 10^{-12}$		
$Pb^{2+} + 2H_2O = Pb(OH)_2^0 + 2H^+$	-19.988	-20.304	$5.9 \times 10^{-5}$	$2.91 \times 10^{-16}$		
$Pb^{2+} + 3H_2O = Pb(OH)_3^- + 3H^+$	-28.091	-28.085	$1.1 \times 10^{-4}$	$5.31 \times 10^{-16}$		
$Pb^{2+} + 4H_2O = Pb(OH)_4^{2-} + 4H^+$	-39.699	-39.054	$1.3 \times 10^{-7}$	$6.21 \times 10^{-19}$		
			$\Sigma = 13.205$			
<i>B. Concentración de Ligandos (M)</i>						
$[Cl^-]$	$[F^-]$	$[Br^-]$	$[SO_4^{2-}]$	$[HCO_3^-]$	$[CO_3^{2-}]$	$[H^+]^\dagger$
0.546	0.0013	0.067	0.0282	$1.12 \times 10^{-4}$	$2.33 \times 10^{-6}$	$9.14 \times 10^{-9}$

\* Para el complejo de bicarbonato, este término es  $c\beta_n [L]^n [H^+]$ .

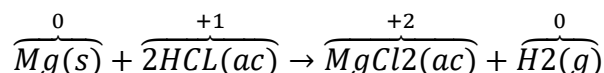
† Calculado a partir de  $\text{pH} = 8.2$  asumiendo que  $yH^+ = 0.69$ .

## CAPÍTULO V

### 5 QUÍMICA REDOX DEL PLOMO

La electroquímica es la rama de la química que estudia la transformación entre la energía eléctrica y la energía química. Los procesos electroquímicos son reacciones redox (oxidación-reducción) en donde la energía liberada por una reacción espontánea se convierte en electricidad o donde la energía eléctrica se aprovecha para inducir una reacción química no espontánea.

En las reacciones redox se transfieren electrones de una sustancia a otra. La reacción entre el magnesio metálico y el ácido clorhídrico es un ejemplo de una reacción redox:



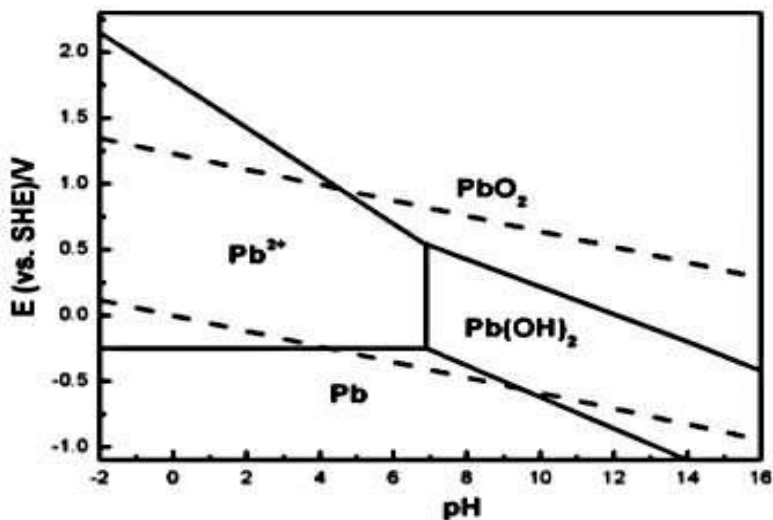
Recuerde que los números que aparecen encima de los símbolos de los elementos indican sus números de oxidación. La pérdida de electrones durante la oxidación de un elemento se distingue por un aumento en su número de oxidación. La reducción de un elemento implica disminución en su número de oxidación debida a la ganancia de electrones. En la reacción anterior, el Mg metálico se oxida y los iones H<sup>+</sup> se reducen; los iones Cl<sup>-</sup> son espectadores (Chang, 2001).

#### 5.1 Diagrama de Pourbaix

Un diagrama de Pourbaix traza un equilibrio estable en las fases de un sistema electroquímico acuoso, tiene como base los equilibrios

electroquímicos y químicos y define el dominio de estabilidad del electrolito, el metal y sus compuestos relacionados en el proceso electrolítico. Los equilibrios se determinan a partir de la ecuación de Nernst y las constantes de equilibrio de los compuestos metálicos (Pilay, 2018).

En la siguiente Figura 9 puede verse el diagrama de Pourbaix para el plomo, observándose cómo se pasiva a pH neutros.



*Figura 9. Diagrama Pourbaix del  $Pb^{2+}$*

Parte de este trabajo es la construcción del diagrama de Pourbaix del Plomo como el que muestra en la Figura 9, por lo tanto, a continuación, mostramos a detalle, paso a paso las ecuaciones para la construcción del diagrama para un sistema Pb -agua, a 25 °C y 1 atmósfera (condiciones estándar).

Como primer paso vamos a determinar las energías libres de formación

de las especies que vamos a considerar en nuestro sistema a 25 °C y 1 atm.

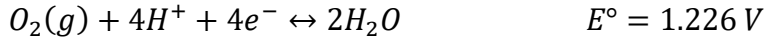
*Tabla 9. Energías de formación, estados y número de oxidación de especies de Pb.*

<b>Especies</b>	<b>Número de oxidación</b>	<b>Estado</b>	<b><math>\Delta G^\circ</math>(KJ/mol)</b>
$H^+$		Ac	0
$H_2$		G	0
$O_2$		G	0
$H_2O$		L	-237,178
$OH^-$		ac	-157,293
Pb	0	S	0
$Pb^{2+}$	+2	ac	-24,3
$PbO_2$	+2	S	-218.99
$Pb(OH)_2$	+2	S	-427.60

Una vez recopilados los valores de las energías libres de Gibbs de formación estándar ( $\Delta G^\circ$ ) de todas las especies, el siguiente paso es escribir las ecuaciones de las diferentes reacciones en las que intervienen estas especies.

**5.1.1 Trazo de la región de estabilidad del agua, los límites oxidantes y reductores del agua:**

Sistema descomposición de O<sub>2</sub>, límite superior



$$E = E^\circ - \frac{0.059}{n} \log \left( \frac{\{red.\}}{\{oxd.\}} \right) \quad \text{Ecuación de Nernst}$$

Aplicamos la ecuación de Nernst:

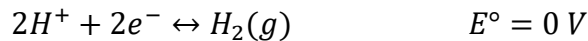
$$E = 1.226 - \frac{0.059}{4} \log \left( \frac{\{H_2O\}}{\{H^+\}^4 P_{O_2}} \right)$$

La actividad del agua es igual a uno, y considerando presiones parciales del oxígeno y nitrógeno de 1 atm por estar a condiciones estándar:

$$E = 1.226 - \frac{0.059}{4} \log \left( \frac{1}{\{H^+\}^4} \right)$$

$$\mathbf{E = 1.226 - 0.059pH} \quad (1)$$

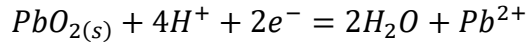
Reacción de descomposición del agua con desprendimiento de hidrógeno, límite inferior:



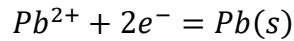
$$E = 0 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{1}{\{H^+\}^2} \right)$$

$$\mathbf{E = 0 - 0.059pH} \quad (2)$$

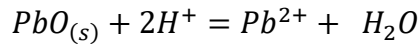
**5.1.2 Ecuaciones de las diferentes reacciones en las que intervienen estas especies**



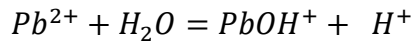
$$\log K = 49.2 ; E^\circ = 1.455V$$



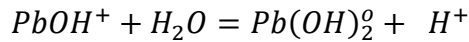
$$\log K = -4.26; E^\circ = -0.126V$$



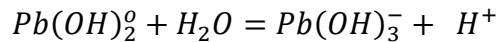
$$\log {}^xK_{s0} = 12.7$$



$$\log {}^xK_1 = -7.7$$



$$\log {}^xK_2 = -9.4$$

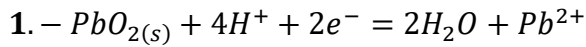


$$\log {}^xK_2 = -11.0$$

Como condición tomamos para todos los iones tienen una concentración 1M entonces:

Desarrollo de ecuaciones:

Equilibrio para el sistema  $PbO_{2(s)}/H_2O$



$$\log K = 49.2 ; E^\circ = 1.455V$$

$$E = 1.455 + \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{[H^+]^4}{[Pb^{2+}]} \right)$$

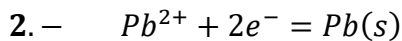
$$E = 1.455 + \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{[H^+]^4}{1} \right)$$

$$E = 1.455 + (0.059 * 2 * \log[H^+])$$

$$E = 1.455 + 0.118 \log[H^+]$$

$$E = 1.455 - 0.118pH \quad (3)$$

Ahora buscamos la ecuación para la siguiente reacción en equilibrio  $Pb^{2+}/Pb(s)$ :



$$\log K = -4.26; E^\circ = -0.126V$$

$$E = -0.126 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{Pb(s)}{[Pb^{2+}]} \right)$$

$$E = -0.126 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{Pb(s)}{[Pb^{2+}]} \right)$$

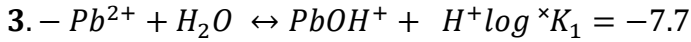
$$E = -0.126 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{Pb(s)}{[Pb^{2+}]} \right)$$

Si tomamos para todos los iones una concentración 1M y la actividad

del solido igual a uno entonces:

$$E = -0.126 \quad (4)$$

Buscamos la ecuación para la siguiente reacción en equilibrio:



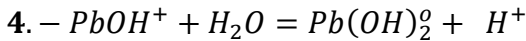
$${}^xK_1 = \frac{[H^+][PbOH^+]}{[Pb^{2+}]} = -7.7$$

$$[H^+] = \frac{{}^xK_1[Pb^{2+}]}{[PbOH^+]}$$

$$-\log[H^+] = -\log\left(\frac{{}^xK_1[Pb^{2+}]}{[PbOH^+]}\right)$$

$$-\log[H^+] = -\log(K_1)$$

$$pH = 7.7 \quad (5)$$



$$\log {}^xK_2 = -9.4$$

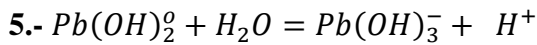
$${}^xK_2 = \frac{[H^+][Pb(OH)_2^o]}{[PbOH^+]} = -9.4$$

$$[H^+] = \frac{{}^xK_2[PbOH^+]}{[Pb(OH)_2^o]}$$

$$-\log[H^+] = -\log\left(\frac{{}^xK_2[PbOH^+]}{[Pb(OH)_2^0]}\right)$$

$$-\log[H^+] = -\log(K_2)$$

$$\mathbf{pH = 9.4} \quad (6)$$



$$\log {}^xK_2 = -11.0$$

$${}^xK_2 = \frac{[H^+][Pb(OH)_3^-]}{[Pb(OH)_2^0]} = -11.0$$

$$[H^+] = \frac{{}^xK_3[Pb(OH)_2^0]}{[Pb(OH)_3^-]}$$

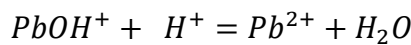
$$-\log[H^+] = -\log\left(\frac{{}^xK_3[Pb(OH)_2^0]}{[Pb(OH)_3^-]}\right)$$

$$-\log[H^+] = -\log(K_3)$$

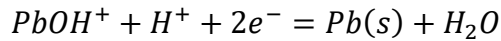
$$\mathbf{pH = 11.0} \quad (7)$$

Adición para el equilibrio  $PbOH^+/Pb(s)$

$$Pb^{2+} + 2e^- = Pb(s) \log K = -4.26$$



$$\log {}^xK_1 = 7.7$$



$$\log K' = 3.44$$

Revisamos la ecuación y esta igualada, y aplicamos la ecuación de Nernts

$$E = E^\circ - \frac{0.059}{n} \log \left( \frac{\{red.\}}{\{oxd.\}} \right)$$

$$E^\circ = - \frac{\Delta Grx^\circ}{n F}$$

$$\Delta Grx^\circ = -RT \ln K'$$

$$\Delta Grx^\circ = -8.31 \frac{J}{mol^\circ K} 298^\circ K \ln 2754.22$$

$$\Delta Grx^\circ = -19.61 \frac{KJ}{mol}$$

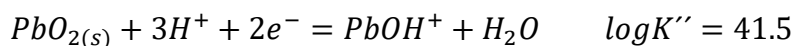
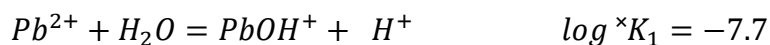
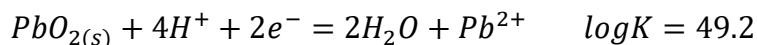
$$E^\circ = - \frac{\left( - \frac{19.61 KJ}{mol} \right)}{2 * 96.5 KJ/molV}$$

$$E^\circ = 0.101 V$$

$$E = 0.101 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{1}{[H^+]} \right)$$

$$\mathbf{E = 0.101 - 0.0295pH} \quad \mathbf{(8)}$$

Ahora la adición para el equilibrio  $PbO_{2(s)}/PbOH^+$



La ecuación está balanceada y aplicamos la ecuación de Nernts:

$$E = E^\circ - \frac{0.059}{n} \log \left( \frac{\{\text{red.}\}}{\{\text{oxd.}\}} \right)$$

$$E^\circ = -\frac{\Delta Grx^\circ}{n F}$$

$$\Delta Grx^\circ = -RT \ln K''$$

$$\Delta Grx^\circ = -8.31 \frac{J}{\text{mol}^\circ K} 298^\circ K \ln 3.16 * 10^{41}$$

$$\Delta Grx^\circ = -236.63 \frac{KJ}{\text{mol}}$$

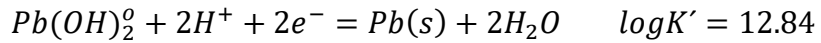
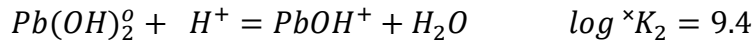
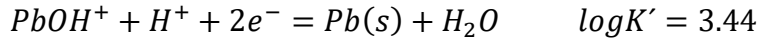
$$E^\circ = -\frac{\left(-\frac{236.63 KJ}{\text{mol}}\right)}{2 * 96.5 KJ/\text{molV}}$$

$$E^\circ = 1.226 V$$

$$E = 1.226 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{1}{[H^+]^3} \right)$$

$$E = 1.226 - 0.0885pH \quad (9)$$

Ahora la adición para el equilibrio  $Pb(OH)_2/Pb(s)$



La ecuación está balanceada y aplicamos la ecuación de Nernts:

$$E = E^\circ - \frac{0.059}{n} \log \left( \frac{\{red.\}}{\{oxd.\}} \right)$$

$$E^\circ = -\frac{\Delta Grx^\circ}{nF}$$

$$\Delta Grx^\circ = -RT \ln K''$$

$$\Delta Grx^\circ = -8.31 \frac{J}{mol^\circ K} 298^\circ K \ln 6.91 * 10^{12}$$

$$\Delta Grx^\circ = -73.21 \frac{KJ}{mol}$$

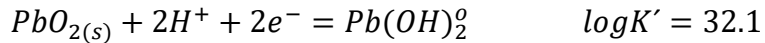
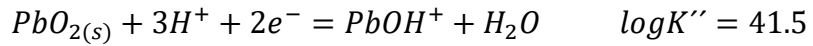
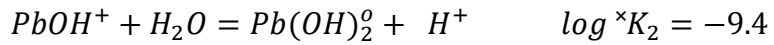
$$E^\circ = -\frac{\left(-\frac{73.21KJ}{mol}\right)}{2 * 96.5 KJ/molV}$$

$$E^\circ = 0.379 V$$

$$E = 0.379 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{1}{[H^+]^2} \right)$$

$$E = 0.379 - 0.059pH \quad (10)$$

Ahora la adición para el equilibrio  $Pb(OH)_2^o/PbO_2$



La ecuación está balanceada y aplicamos la ecuación de Nernts:

$$E = E^\circ - \frac{0.059}{n} \log \left( \frac{\{red.\}}{\{oxd.\}} \right)$$

$$E^\circ = -\frac{\Delta Grx^\circ}{nF}$$

$$\Delta Grx^\circ = -RT \ln K''$$

$$\Delta Grx^\circ = -8.31 \frac{J}{mol^\circ K} 298^\circ K \ln 1.25 * 10^{32}$$

$$\Delta Grx^\circ = -183.03 \frac{KJ}{mol}$$

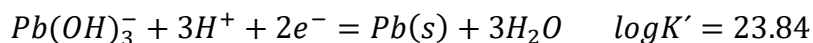
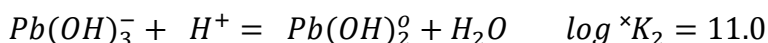
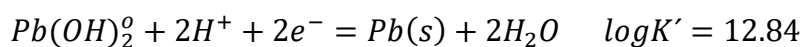
$$E^{\circ} = -\frac{\left(-\frac{183.03\text{KJ}}{\text{mol}}\right)}{2 * 96.5 \text{ KJ/molV}}$$

$$E^{\circ} = 0.9483 \text{ V}$$

$$E = 0.9483 - \frac{0.059}{2} \log\left(\frac{1}{[H^+]^2}\right)$$

$$E = 0.9483 - 0.059\text{pH} \quad (11)$$

Ahora la adición para el equilibrio  $Pb(OH)_3^-/Pb(s)$



La ecuación está balanceada y aplicamos la ecuación de Nernts:

$$E = E^{\circ} - \frac{0.059}{n} \log\left(\frac{\{\text{red.}\}}{\{\text{oxd.}\}}\right)$$

$$E^{\circ} = -\frac{\Delta Grx^{\circ}}{n F}$$

$$\Delta Grx^{\circ} = -RT \ln K''$$

$$\Delta Grx^{\circ} = -8.31 \frac{J}{\text{mol}^{\circ}K} 298^{\circ}K \ln 6.91 * 10^{23}$$

$$\Delta Grx^\circ = -135.93 \frac{KJ}{mol}$$

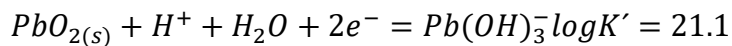
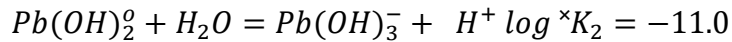
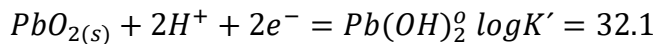
$$E^\circ = -\frac{\left(-\frac{135.93KJ}{mol}\right)}{2 * 96.5 KJ/molV}$$

$$E^\circ = 0.7043 V$$

$$E = 0.7043 - \frac{0.059}{2} \log\left(\frac{1}{[H^+]^3}\right)$$

$$E = 0.7043 - 0.0885pH \quad (12)$$

Ahora la adición para el equilibrio  $Pb(OH)_3^- / PbO_2(s)$



La ecuación está balanceada y aplicamos la ecuación de Nernts:

$$E = E^\circ - \frac{0.059}{n} \log\left(\frac{\{red.\}}{\{oxd.\}}\right)$$

$$E^\circ = -\frac{\Delta Grx^\circ}{n F}$$

$$\Delta Grx^\circ = -RT \ln K''$$

$$\Delta Grx^\circ = -8.31 \frac{J}{mol^\circ K} 298^\circ K \ln 1.25 * 10^{21}$$

$$\Delta Grx^\circ = -120.31 \frac{KJ}{mol}$$

$$E^\circ = - \frac{(- \frac{120.31 KJ}{mol})}{2 * 96.5 KJ/molV}$$

$$E^\circ = 0.6233 V$$

$$E = 0.6233 - \frac{0.059}{2} \log \left( \frac{1}{[H^+]} \right)$$

$$E = 0.6233 - 0.0295pH \quad (13)$$

Trasladamos todas las ecuaciones a Excel, el mismo que se adjunta a este trabajo y se obtiene la Figura 10, el cual muestra los equilibrios entre las diferentes especies que interactúan el plomo con el agua.

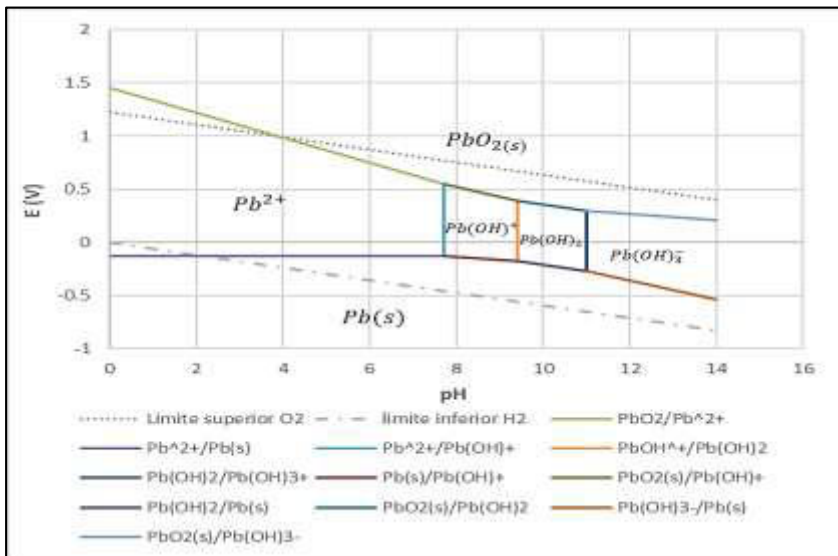


Figura 10. Diagrama Pourbaix para el sistema plomolagua.

En este gráfico podemos observar una línea horizontal que representa al sistema  $Pb^{2+}/Pb(s)$  por lo tanto el potencial E es independiente del pH. Las líneas oblicuas como la del equilibrio  $Pb(OH)_3^-/PbO_2(s)$  indican que E es una función del pH y están regidas por la ecuación de Nernst. Las líneas verticales como las del equilibrio  $Pb(OH)_2^0/Pb(OH)_3^-$ , indican que el potencial E es independiente del pH.

Además de las reacciones del sistema metal-agua en estudio, hay que considerar las reacciones del agua. El agua puede descomponerse en oxígeno y en hidrógeno y marcan los límites superiores e inferiores donde el agua no se descompone por desprendimiento de hidrógeno y/o oxígeno.

La región estable de nuestro gráfico está predominada por las especies  $PbOH^+$  y  $Pb^{2+}$ , el más oxidante es la especie  $PbO_2(s)$  y el más reductor es la especie  $Pb(s)$ .

## GLOSARIO

**Ácido – Base (Brønsted):** Concepto que define a un ácido como un donador de protones ( $H^+$ ) y a una base como un aceptor de protones. Cada ácido tiene una base conjugada y viceversa

Agencia de las Naciones Unidas responsable de coordinar acciones internacionales en salud pública, estableciendo guías y recomendaciones sobre la exposición al plomo y sus riesgos para la salud.

**ATSDR:** (Agency for Toxic Substances and Disease Registry – Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades)

**Autoionización del agua:** Reacción en la que dos moléculas de agua reaccionan entre sí produciendo iones  $H^+$  y  $OH^-$ , estableciendo la base del concepto de pH

**Baterías Ácido-Plomo (BAPU):** Acumuladores eléctricos que representan la principal fuente de consumo y reciclaje de plomo a nivel mundial.

**Bioacumulación:** Proceso mediante el cual organismos vivos acumulan contaminantes, como el plomo, en sus tejidos a lo largo del tiempo.

**Biomagnificación:** Incremento de la concentración de un contaminante a medida que se avanza en la cadena trófica.

**Codex Alimentarius:** Conjunto de normas internacionales relacionadas con inocuidad y calidad de alimentos. Define valores máximos permitidos de contaminantes como el plomo en distintos productos

**Complejación del Plomo:** Proceso químico en el cual el ion  $Pb^{2+}$  se asocia con otras especies químicas (cloruros, carbonatos, sulfatos, etc.), modificando su solubilidad y movilidad en el medio

**Diagrama de Pourbaix:** Representación gráfica que muestra las zonas de estabilidad de las especies químicas de un elemento (como el plomo) en función del pH y el potencial de oxidación-reducción (Eh). Se utiliza para entender la química redox

**EPA (Environmental Protection Agency):** Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Establece normas y regulaciones para proteger la salud humana y el medio ambiente, incluyendo límites de plomo en agua, aire y suelo.

**Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS).** Técnica instrumental utilizada para detectar plomo en alimentos y muestras ambientales. Mide la absorción de radiación por átomos en estado gaseoso

**Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS):** Técnica instrumental de alta sensibilidad para detectar metales en niveles ultratraza.

**Fitoremediación:** Uso de plantas para absorber, inmovilizar o degradar contaminantes como el plomo en suelos y aguas.

**IARC (International Agency for Research on Cancer / Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer):** Institución de la OMS que clasifica agentes cancerígenos; ha catalogado al plomo como probable carcinógeno humano.

**INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización):** Organismo que establece normas técnicas en Ecuador, incluyendo parámetros sobre plomo en agua, pinturas y alimentos.

**Ion Hidronio ( $H_3O^+$ ):** Especie química formada cuando una molécula de agua acepta un protón. Es fundamental en la definición del pH y de la acidez de las disoluciones.

**LMPE-PPT (Límite Máximo Permissible de Exposición – Promedio Ponderado en el Tiempo):** Concentración máxima de contaminantes permitida en ambientes laborales durante una jornada laboral típica.

**Neurotoxicidad:** Efectos dañinos de sustancias químicas, como el plomo, sobre el sistema nervioso.

**NOM (Norma Oficial Mexicana):** Conjunto de regulaciones técnicas obligatorias en México que establecen límites permisibles de contaminantes como el plomo en agua, suelo y alimentos.

**ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible):** Agenda de la ONU con metas globales; el ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y el ODS 3 (salud y bienestar) están vinculados a la reducción de exposición al plomo.

**Pb (Plomo):** Elemento químico con número atómico 82, considerado un metal pesado tóxico para la salud y el ambiente.

**pH:** Medida logarítmica de la concentración de protones en una disolución, utilizada como indicador de acidez o basicidad.

**Precipitación/Disolución:** Procesos químicos en los que un compuesto sólido se forma a partir de una disolución (precipitación) o, por el contrario, el sólido se disuelve liberando sus iones al medio líquido.

**Producto iónico del agua (K<sub>w</sub>):** Constante de equilibrio de la autoionización del agua. A 25 °C su valor es  $1,0 \times 10^{-14}$ . Permite relacionar las concentraciones de H<sup>+</sup> y OH<sup>-</sup>.

**UNEP (United Nations Environment Programme / Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente):** Organismo internacional que promueve regulaciones y acciones globales contra la contaminación por plomo.

**WHO (World Health Organization – Organización Mundial de la Salud, OMS)**

## BILBIOGRAFÍA

- A Poma, P. (2013). Intoxicación por plomo en humanos. *Anales de La Facultad de Medicina*, 69(2).  
<https://doi.org/10.15381/anales.v69i2.1155>
- Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals*. Springer.
- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR). (2007). *Resumen de salud pública: Plomo*.
- Ahlberg, G., Gustafsson, Ö., & Wedel, P. (2006). Leaching of metals from sewage sludge during one year and their relationship to particle size. *Environmental Pollution*, 144(2), 545–553.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.01.024>
- Bollhöfer, A., & Rosman, K. J. R. (2001). Isotopic source signatures for atmospheric lead: The Northern Hemisphere. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(11), 1727–1740.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00630-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00630-X)
- Centers for Disease Control, & (CDC), P. (1991). *Preventing lead poisoning in young children*.
- Chang, R. (2001). *Química* (10th ed.). McGraw-Hill.
- Culkin, F. (1965). The major constituents of sea water. In J. P. Riley & G. Skirrow (Eds.), *Chemical oceanography* (Vol. 2, pp. 121–161). Academic Press.

- Ministerio del Ambiente (Perú). (2017a). *Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire.*
- Ministerio del Ambiente (Perú). (2017b). *Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua.*
- Ministerio del Ambiente (Perú). (2017c). *Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM. Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo.*
- Norma Oficial Mexicana NOM-010-STPS-1999. (1999). *Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.*  
<http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-010.pdf>
- Norma Oficial Mexicana NOM-047-SSA1-2011. (2012). *Salud ambiental. Índices biológicos de exposición.*  
[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5249877&fecha=06/06/2012](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5249877&fecha=06/06/2012)
- Norma Oficial Mexicana NOM-199-SSA1-2000. (2000). *Salud ambiental. Niveles de plomo en sangre y acciones como criterios.*  
<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/199ssa10.html>
- Nriagu, J. O. (1990). The rise and fall of leaded gasoline. *Science of the Total Environment*, 92, 13–28. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(90\)90257-L](https://doi.org/10.1016/0048-9697(90)90257-L)
- Patterson, C. C. (1971). Native copper, silver, and gold accessible to early metallurgists. *American Antiquity*, 36(3), 286–321.  
<https://doi.org/10.2307/278189>

- Pilay, L. (2018). *Construcción y caracterización de un reactor de electrocoagulación tipo batch*.  
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19589/1/CD-8986.pdf>
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., Quintana, C., & Campos, A. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 5(1–2), 1–7.
- Rieuwerts, J., Farago, M., Cikrt, M., & Bencko, V. (1999). Heavy metal concentrations in and around households near a secondary lead smelter. *Environmental Monitoring and Assessment*, 58(2), 317–335. <https://doi.org/10.1023/A:1006096632260>
- Shiharata, H., Elias, W., & Patterson, C. C. (1980). Chronological variations in concentrations and isotopic compositions of anthropogenic atmospheric lead. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 44(2), 149–162. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(80\)90136-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(80)90136-0)
- Stumm, W., & Morgan, J. J. (1996). *Aquatic chemistry* (3rd ed.). Wiley-Interscience.
- Téllez, J., & Bautista, M. (2005). Exposición ocupacional a plomo: Aspectos toxicológicos. *Avances En Enfermería*, 1(1), 31–44.
- Véron, A., Flament, P., Bertho, M. L., Alleman, L., Flegal, R., & Hamelin, B. (1999). Isotopic evidence of pollutant lead sources in northwestern France. *Atmospheric Environment*, 33(19), 3377–

3388. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00376-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00376-9)

WANG, Y. yan, CHAI, L. yuan, CHANG, H., PENG, X. yu, & SHU, Y. de. (2009). Equilibrium of hydroxyl complex ions in  $Pb^{2+}$ - $H_2O$  system. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 19(2), 458–462. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60295-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60295-2)



**Química del plomo y su impacto en la calidad del ambiente, se publicó  
en el mes de diciembre de 2025.**

**ISBN: 978-9907-0-0503-5**

**Editorial InvestiGo  
Riobamba – Ecuador  
Cel: +593 97 911 9620  
publicaciones@grupobl.com**

# BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

---

## **Franz Patricio Verdezoto Mendozaa:**

Franz Verdezoto Mendoza nació en Ecuador el 18 de diciembre de 1981. Ingeniero Químico con maestría en Cambio Climático. Inició su carrera en el área ambiental pública y privada, ocupando cargos relevantes de Subsecretario de Calidad Ambiental, director de Ambiente y actual docente titular en la Universidad Estatal de Bolívar.

## **Juan Alberto Gaibor Chávez:**

Profesor Investigador de la Universidad Estatal de Bolívar. Nación en Guaranda, Ecuador. Formación en Ingeniería Agroindustrial, con énfasis en estudios del ambiente, tratamiento de residuos sólidos con fines energéticos y como bioinsumos.

## **Isidro Favián Bayas Morejón:**

Isidro Favián Bayas-Morejón, PhD, se desempeña como Director de Investigación y Vinculación y docente-investigador en el CIMABiF de la Universidad Estatal de Bolívar, cuenta con más de 70 publicaciones científicas y un libro. Sus investigaciones se centran en alimentos funcionales, microbiología aplicada, fitoquímica y biotecnología, con énfasis en compuestos bioactivos, seguridad alimentaria e innovación sostenible. Ha participado en congresos internacionales en Europa y Latinoamérica, promoviendo la vinculación ciencia-sociedad y el fortalecimiento de redes de investigación.

## **Edgar Fabián Rivera Guzmán:**

Fabián Rivera, Ingeniero Industrial y Magíster en Electrónica, doctorando en Ciencias Computacionales, docente desde 2016, actualmente en la Universidad Estatal de Bolívar. Investiga y colabora en tecnologías emergentes de la Industria 4.0 como IA, visión artificial, minería de datos, realidad aumentada e IoT, publicando en congresos y revistas internacionales.

# QUÍMICA DEL PLOMO Y SU IMPACTO EN LA CALIDAD DEL AMBIENTE

---

**Estimado lector,** Este documento ofrece un análisis integral sobre la química del plomo y su repercusión en la salud pública y el medio ambiente. Identificado como un metal pesado altamente tóxico y un probable carcinógeno humano, el plomo carece de funciones biológicas útiles y es extremadamente persistente en el entorno. Su presencia ambiental ha aumentado drásticamente debido a actividades antropogénicas como la minería, la metalurgia, la fabricación de baterías de ácido-plomo y el uso histórico de gasolina con plomo.

El estudio detalla cómo el plomo se incorpora a los recursos hídricos y a la cadena alimentaria mediante la lixiviación de suelos, descargas industriales y la corrosión de tuberías antiguas. Las poblaciones más vulnerables son los niños y las mujeres embarazadas, en quienes la exposición puede causar daños neurológicos irreversibles, retraso en el desarrollo cognitivo y complicaciones fetales.

Desde una perspectiva técnica, el texto profundiza en la química del plomo mediante el análisis de diagramas de especiación ( $\log C$ -pH) y de Pourbaix, determinando que la especie soluble dominante varía según la acidez del medio. Finalmente, el documento destaca la importancia de marcos regulatorios nacionales e internacionales, como los de la OMS, EPA y el INEN en Ecuador, para establecer límites máximos permisibles y fomentar estrategias de mitigación que incluyan tecnologías de tratamiento de aguas y programas de educación ambiental.



Editorial InvestiGo  
Riobamba – Ecuador  
Cel: +593 97 911 9620  
[publicaciones@grupobl.com](mailto:publicaciones@grupobl.com)

ISBN: 978-9907-0-0503-5



9 789907 1005035