



universidad
de león



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

**ESTUDIO BIBLIOMÉTRICO DE LA
PRESENCIA DE PLOMO EN EL MEDIO
AMBIENTE**

**BIBLIOMETRIC STUDY OF THE
PRESENCE OF LEAD IN THE
ENVIRONMENT**

Autor: Adrián Castrillo Blanco

Tutores: Fernando José Pereira García y María

Illuminada Muñoz Lucas

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Julio, 2023

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Características generales del plomo.....	1
1.2	Toxicidad y efectos para la salud humana	1
1.3	Fuentes de emisión.....	3
1.4	Dinámica ambiental	4
1.5	Justificación del TFG.....	7
2	OBJETIVOS.....	7
3	METODOLOGÍA	8
3.1	Estudios preliminares.....	9
3.2	Estudios de compartimentos ambientales que contamina el plomo	9
3.3	Estudio de fuentes antropogénicas de emisión de plomo	9
3.4	Estudio de técnicas de análisis y determinación de plomo	10
3.5	Estudio de métodos de eliminación de plomo	11
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	11
4.1	Estudios preliminares.....	11
4.2	Estudios de compartimentos ambientales que contamina el plomo	14
4.3	Estudio de fuentes antropogénicas de emisión de plomo	16
4.4	Estudio de técnicas de análisis y determinación de plomo.....	18
4.5	Estudio de métodos de eliminación de plomo	22
5	CONCLUSIONES	24
6	BIBLIOGRAFÍA.....	25
7	ANEXOS.....	31

ABSTRACT

Lead is a highly toxic heavy metal that can produce many adverse effects on human health and the environment depending on the concentration in which it is found. The objectives of this work are: to carry out bibliometric studies referring to environmental compartments in which lead is found, anthropogenic sources of emission, methods of analysis and determination and methods of elimination and to determine which is the database that contributes the greatest number of publications to the studies carried out. The environmental compartments in which lead has been mostly studied are water and soil, the most common anthropogenic emission source is mining, the most studied analysis and determination method is Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), and the most used removal method is adsorption. It was observed that the WOS platform provides a greater number of publications than Scopus in the studies carried out.

Keywords: adsorption, ICP-MS, lead, mining, soil, water.

RESUMEN

El plomo es un metal pesado altamente tóxico que puede producir gran cantidad de efectos adversos sobre la salud humana y el medio ambiente dependiendo de la concentración en la que se encuentre. Los objetivos de este trabajo son: realizar estudios bibliométricos referidos a compartimentos ambientales en los que se encuentra el plomo, fuentes antropogénicas de emisión, métodos de análisis y determinación y métodos de eliminación y determinar cuál es la base de datos que aporta un mayor número de publicaciones a los estudios realizados. Los compartimentos ambientales en los que se ha estudiado mayormente el plomo son el agua y el suelo, la fuente de emisión antropogénica más común es la minería, el método de análisis y determinación más estudiado la Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS) y el método de eliminación más empleado es el de adsorción. Se observó que la plataforma WOS aporta un mayor número de publicaciones que es Scopus en los estudios realizados.

Palabras clave: adsorción, agua, ICP-MS, minería, plomo, suelo.

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, ha habido un aumento generalizado de actividades como el tráfico, la extracción de recursos, las emisiones industriales o la agricultura intensiva (Róžański *et al.*, 2017)., las cuales generan gran cantidad de sustancias tóxicas y contaminantes como, por ejemplo, metales pesados que causan graves problemas tanto a la salud humana como al medio ambiente (Zhang *et al.*, 2020).

El término “metal pesado” tiene diferentes acepciones, siendo una de las más empleadas la relacionada con su peso atómico, que lo define como un elemento químico con una masa atómica comprendida entre 63.55 (Cu) y 200.59 (Hg). Otra acepción hace referencia a los metales que tienen una densidad comprendida entre 4 g/cm³ y 7 g/cm³ (Ministerio para la Transición Ecológica, 2023).

La problemática y peligrosidad de los metales pesados se debe a que no pueden ser eliminados tanto de forma biológica como de forma química. Además, se bioacumulan y biomagnifican en los seres vivos aumentando sus concentraciones según ascendemos en la cadena trófica (Zheng *et al.*, 2023). Los metales como el plomo (Pb), el mercurio (Hg), el arsénico (As) o el cadmio (Cd) forman parte de la lista de metales pesados tóxicos que pueden causar graves daños tanto a la salud humana como al medio ambiente incluso a pequeñas concentraciones. Esto indica la importancia de monitorizar y controlar estos contaminantes en alimentos o en diferentes matrices ambientales.

1.1 Características generales del plomo

El plomo es un metal blando de color azulado, plateado y gris y que se encuentra presente de forma natural en la corteza terrestre (Cameo Chemicals, 2019).

Su número atómico es 82 y su peso molecular es de 207 u, tiene a 1 atm un punto de fusión de 327.4 °C y un punto de ebullición de 1740 °C, densidad 11.34 g/cm³ y presión de vapor de 1.77 mm de Hg a 1000 °C (PubChem, 2018).

1.2 Toxicidad y efectos para la salud humana

Para la Organización Mundial de la Salud (OMS), el plomo es una de las diez sustancias químicas más peligrosas para el ser humano, lo que requiere un control y seguimiento con el objetivo de proteger la salud de trabajadores, niños y mujeres en edad reproductiva (Organización Mundial de la Salud, 2021).

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) ha establecido dos límites distintos para la exposición de plomo transmitido a través del aire. Por un lado, el nivel de acción que corresponde con el valor de concentración de plomo a partir del cual deben adoptarse medidas de control. Dicho nivel de acción tiene un valor ponderado de 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para un período de ocho horas. Por otro lado, el Límite de Exposición Profesional (LEP) para la exposición al plomo transportado por el aire, para el mismo periodo, es de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, la OSHA exige el control de los niveles de plomo en sangre cada 6 meses para trabajadores expuestos a un nivel de plomo en aire superior al nivel de acción (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional, 2012). El plomo puede ser absorbido por inhalación, ingestión o a través de la piel siendo el tamaño de la partícula, la naturaleza orgánica o inorgánica o la vía de absorción las características que determinan su concentración en el cuerpo (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional, 2019).

Los síntomas producidos por la exposición de plomo varían dependiendo de si la exposición es crónica o aguda. La exposición aguda causa náuseas, cefaleas, trastornos cognitivos y emocionales mientras que la exposición crónica causa ansiedad, irritabilidad y fatiga (Mason *et al.*, 2014). A continuación, en la Tabla 1 se enumeran, para los diferentes sistemas y aparatos del cuerpo humano, los trastornos que ocasiona la exposición al plomo.

Tabla 1. Trastornos debidos a la exposición al plomo (Marteles *et al.*, 2005).

Sistema o aparato afectado	Trastornos
Sistema nervioso central	Fatiga, malestar Disminución de la libido Irritabilidad, ánimo deprimido Alteración de la función neuropsicológica Cefalea Tremor Encefalopatía
Sistema nervioso periférico	Debilidad motora
Aparato digestivo	Anorexia Náuseas Constipación Pérdida de peso Dolor abdominal
Sistema renal	Insuficiencia renal crónica Nefritis intersticial Proteinuria leve

Sistema o aparato afectado	Trastornos
Aparato locomotor	Mialgias, artralgias Gota
Sistema cardiovascular	Hipertensión
Aparato reproductor	Oligospermia

1.3 Fuentes de emisión

El plomo es un metal que liberado al medio ambiente tanto por fuentes naturales como antropogénicas (Men *et al.*, 2018). Una de las fuentes de emisión antropogénicas de plomo más común es a través de la minería por medio de la extracción de minerales que contienen este metal. El mineral más extraído es la galena (PbS), que representa aproximadamente el 50% de los minerales de plomo utilizados en la actualidad (Blowes *et al.*, 2014).

Tanto los depósitos de galena como los desechos que se generan en las minas, al sufrir meteorización, liberan Pb^{2+} (ac) al medio, provocando la formación de minerales de plomo secundarios, como cerusita ($PbCO_3$) o anglesita ($PbSO_4$) (Bao *et al.*, 2021). Estos minerales secundarios de plomo presentan gran solubilidad en agua, lo que impacta directamente en la liberación, movilidad y disponibilidad del plomo disuelto, derivando en un impacto sobre la salud humana y sobre el medio ambiente (Brown *et al.*, 1999).

El plomo liberado de los depósitos de galena también puede ser absorbido por otros minerales, como el sulfuro de cobre (calcocita, Cu_2S) o el sulfuro de hierro (pirita, FeS_2) introduciéndose los átomos del metal en la estructura de la calcopirita y de la pirita y sustituyendo a los átomos de cobre y hierro, respectivamente, lo que puede causar un peligro a la salud humana incluso en concentraciones más bajas (Hamilton *et al.*, 2021).

Además de la minería, existen otras fuentes antropogénicas de liberación de plomo como gases de combustión de los automóviles, fontanería de plomo o industrias de pintura (Needleman, 2004). Durante el siglo XX, una de las fuentes antropogénicas principales estaba constituida por el uso de plomo como aditivo de combustibles en forma de tetraetilo de plomo (TEL), compuesto que comenzó a usarse como agente antidetonante en la gasolina en la década de 1920 (Nriagu, 1990). El uso de TEL se extendió a nivel mundial, estimándose que entre el 80 y el 90% del plomo atmosférico presente en las grandes ciudades, durante dicho periodo de tiempo, procedía de su utilización masiva (Lacerda *et al.*, 2023).

El uso de TEL comenzó a disminuir en la década de 1970, cuando Japón, EEUU y, posteriormente, algunos países europeos comenzaron a introducir gasolinas sin plomo (Singh

and Singh, 2006). Tras la eliminación del TEL de las gasolinas a principios del siglo XXI, se ha comprobado que las concentraciones de plomo en la atmósfera han disminuido notoriamente (Meyer *et al.*, 2003; Link *et al.*, 2007; Wensman *et al.*, 2022).

Otra fuente importante de plomo, a nivel antropogénico, la constituyen las tuberías de plomo, por las que durante muchos años se transportaba el agua a los hogares. A finales del siglo XIX y principios del XX se observó que la concentración de plomo en el organismo humano había aumentado drásticamente, y que parte de ese aumento se debía a la presencia de plomo en la composición de las tuberías que suministraban el agua para uso doméstico (Triantafyllidou y Edwards, 2012). El plomo se disolvía en el agua potable a través de los lixiviados de las tuberías acabando en nuestros hogares (Jarvis *et al.*, 2018). Actualmente, la prohibición de fabricación de este tipo de tuberías (Ministerio de la presidencia, 2003) ha reducido la concentración de plomo en el medio ambiente, aunque todavía se siguen utilizando gran cantidad de tuberías de plomo por todo el mundo (Kamenov *et al.*, 2023).

Las pinturas constituyen otra fuente antropogénica de plomo. Durante el siglo XX, el plomo era uno de los pigmentos más importantes en las pinturas del hogar, encontrándose en forma de PbCO_3 y cromato de plomo (II) (PbCrO_4) (Tooms *et al.*, 2023), debido a que este tipo de pinturas hacían que las aplicaciones fuesen más duraderas, adherentes, coloridas y resistentes a grietas, entre otras (O'Connor *et al.*, 2018).

1.4 Dinámica ambiental

El plomo es un elemento químico que puede encontrarse en tres estados de oxidación diferentes: Pb^0 , Pb^{2+} y Pb^{+4} . Dependiendo de las condiciones de pH y redox del medio, el plomo se encuentra en diferentes estados, como se muestra en la Figura 1.

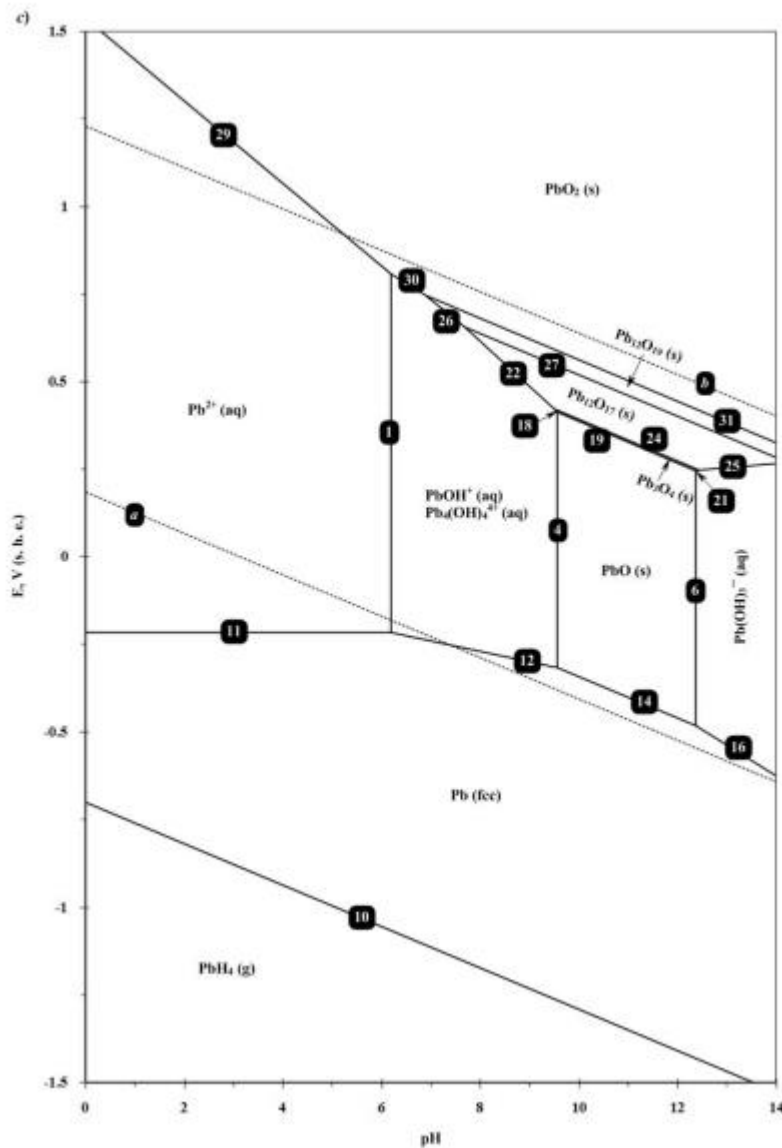


Figura 1. Especiación del plomo en función del potencial redox y del pH del medio a 298 K, 1 bar y $[Pb] = 10^{-3}$ mol/L considerando $PbO(s)$. Los números indican los equilibrios químicos correspondientes a las transiciones entre las diferentes especies químicas. Fuente: (Nikolaychuk, 2018).

En esa figura, se aprecia que, en condiciones oxidantes y valores de pH ácidos, el Pb^{2+} es la especie predominante en disolución acuosa. En estas condiciones, el Pb^{2+} abunda en detrimento de las especies de plomo hidroxiladas debido a la no presencia de grupos hidroxilos (OH^-) en la disolución a los que ligarse. A medida que aumenta el valor del pH sin variar las condiciones oxidantes, se observa cómo el plomo se une a OH^- formando especies como $PbOH^+$ y $Pb_4(OH)_4^{4+}$ que al poseer carga positiva permanecen en disolución acuosa. Manteniendo las condiciones oxidantes, pero cambiando el pH a valores básicos (10-12), el plomo precipita en forma de PbO , Pb_3O_4 , $Pb_{12}O_{17}$ y $Pb_{12}O_{19}$, variando la especie en función de las condiciones de

oxidación. Si el pH continúa aumentando (valores mayores de 12), las especies sólidas pueden disolverse debido al exceso de OH^- en el medio, favoreciendo la formación de especies aniónicas, entre las que destaca el $\text{Pb}(\text{OH})_3^-$. Si cambiamos a condiciones ligeramente reductoras abunda la forma metálica del plomo mientras que, a condiciones extremadamente reductoras, la única especie disponible es el PbH_4 (g), cuya presencia se ve favorecida en un medio ácido, debido a que requiere la presencia en el medio de gran cantidad de protones. En condiciones de extremadamente oxidantes la especie que predomina es PbO_2 (s).

En la Tabla S2 (Apartado 7. Anexos) se muestran los equilibrios químicos correspondientes a las transiciones entre las diferentes especies químicas de plomo con sus respectivas reacciones químicas.

Además, a través de la Figura 2 mostrada a continuación se analizó el movimiento del plomo a través de las matrices agua, suelo y aire.

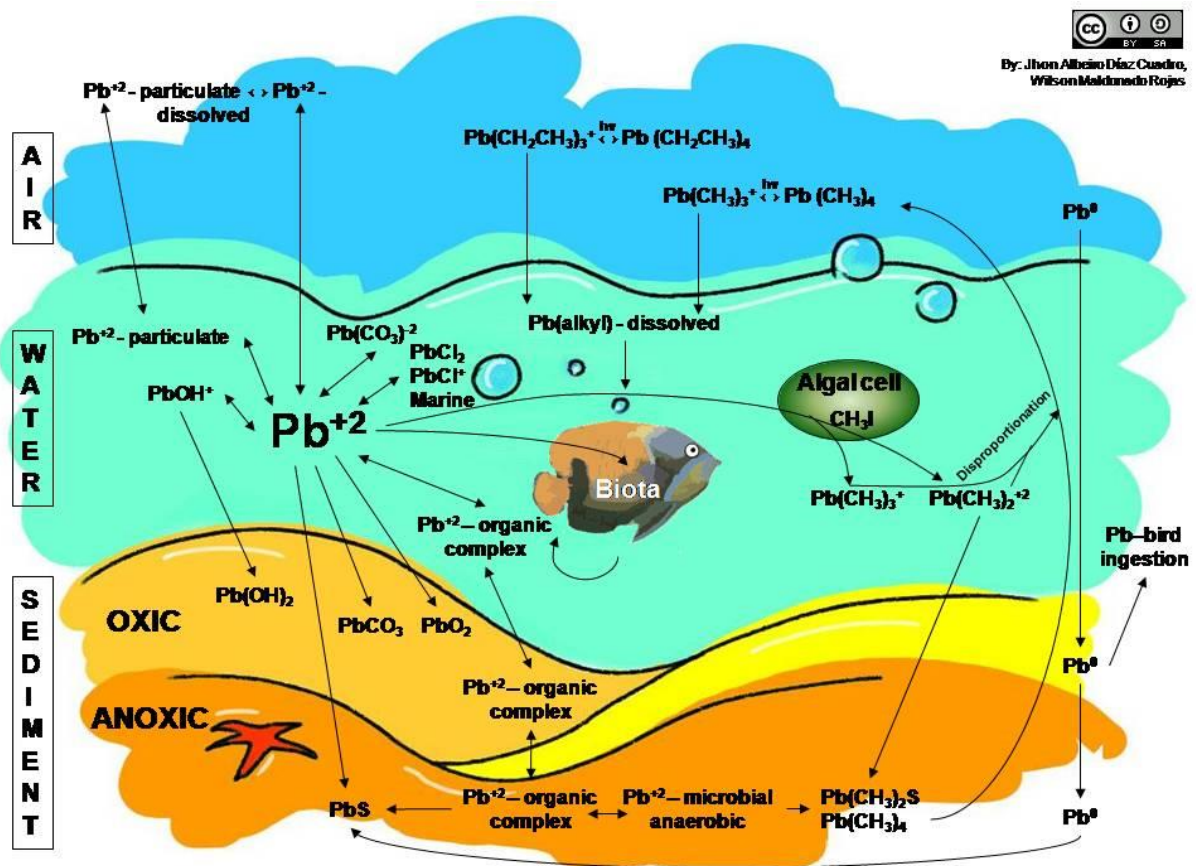


Figura 2. Dinámica ambiental del plomo en las matrices aire, suelo y agua. Fuente: (Grupo de Investigación en Ciencia, Educación, 2010).

En la Figura 2 se observa que la especie Pb^{+2} es la principal ya que a partir de ella se generan el resto de especies de plomo en los diferentes compartimentos ambientales. En el caso del aire, el Pb^{+2} se une a partículas en suspensión, en el agua, destacar la unión del Pb^{+2} con

complejos orgánicos que pueden ser añadidos a la cadena trófica a través de los animales y las plantas. Finalmente, en el suelo las especies formadas dependerán si las condiciones son aerobias o anaerobias, formándose $\text{Pb}(\text{OH})_2$, PbCO_3 y PbO_2 en ambientes oxigenados y sulfuros de plomo en ambientes sin oxígeno.

1.5 Justificación del TFG

La salud es un estado de completo bienestar físico, mental y social (Organización Mundial de la Salud, 2023) que es necesario conservar. Existen gran cantidad de contaminantes que hacen que disminuya la salud, tanto del ser humano como del medio ambiente, y los metales pesados son uno de ellos. Estos metales son altamente contaminantes, por lo que, para mantener una salud adecuada, es necesario conocer su comportamiento en el medio ambiente, las condiciones en las que se encuentran y los problemas que pueden provocar en el medio. Con este conocimiento científico, se reduce el riesgo de contaminación.

Considero que este TFG es importante ya que se centra en uno de los metales pesados más contaminantes que existe como es el plomo. A través de los estudios llevados a cabo, se ha podido conocer el interés científico que actualmente tiene el plomo en el medio ambiente, tanto desde el punto de vista de su procedencia y qué compartimentos contamina preferentemente, como de las técnicas más empleadas para analizarlo y eliminarlo del medio.

2 OBJETIVOS

Para el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se ha planteado un objetivo general y dos objetivos particulares. El objetivo general consiste en evaluar bibliométricamente el estado de la cuestión del plomo desde el punto de vista ambiental.

Para alcanzar este objetivo general, se proponen los siguientes objetivos particulares:

1. Determinar cuál es la plataforma de búsqueda de artículos científicos que aporta un mayor número de publicaciones para los estudios llevados a cabo.
2. Estudiar en qué compartimentos ambientales se encuentra principalmente el plomo y cuáles son sus fuentes antropogénicas.
3. Conocer en mayor medida las técnicas analíticas de determinación de plomo y los métodos más utilizados para eliminar este metal del medio ambiente.

3 METODOLOGÍA

Para alcanzar los objetivos propuestos, se llevaron a cabo una serie de estudios bibliométricos a partir de los cuales se recopiló información referida al número de artículos científicos que versan acerca del plomo, de las matrices ambientales en las que se encuentra, de las fuentes de emisión más relevantes, de las técnicas de eliminación más empleadas y de los métodos de análisis y determinación más utilizados.

A la hora de llevar a cabo las búsquedas, se empleó el método descrito en trabajos previos llevados a cabo en el Área de Química Analítica de la Universidad de León (Alonso Pozuelo, 2019; García Arauzo, 2019). Este método consiste en efectuar rastreos en buscadores bibliográficos de *Internet*, en inglés, utilizando varios operadores *booleanos* para maximizar la pertinencia de los resultados. El primero de ellos, AND, se utiliza para realizar búsquedas que incluyen los dos términos adyacentes al operador. El segundo, OR, se emplea para búsquedas que incluyen uno u otro término adyacente o ambos a la vez. El tercer y último operador, NOT, permite descartar términos concretos. Además de dichos operadores, también se utilizaron paréntesis para agrupar términos considerados sinónimos, comillas para búsquedas literales y asteriscos para búsquedas de términos que contengan la misma raíz.

Para aumentar la pertinencia en los resultados, se acotó la búsqueda a artículos científicos, de revisión y capítulos de libro. Estas contribuciones científicas se publicaron en el entre 2012 y 2022, exceptuando la búsqueda de publicaciones referidas a las fuentes de emisión de plomo más comunes, en los que el intervalo de tiempo se amplió hasta el año 2000. Esta modificación se llevó a cabo con el propósito de comprobar si en los años posteriores a la prohibición de liberación de plomo a través de la minería, los combustibles, las tuberías de agua sanitaria y las pinturas el número de artículos publicados es mayor respecto a años posteriores.

En cuanto a los buscadores seleccionados, se descartaron las plataformas Google Scholar, SpringerLink y ScienceDirect, debido a las conclusiones extraídas en los trabajos anteriormente mencionados. La primera plataforma fue descartada debido a la gran cantidad de elementos no pertinentes que arrojan sus búsquedas, mientras que las segunda y tercera plataformas se excluyeron debido a que proporcionan un menor número de artículos, puesto que muestran resultados publicados únicamente en las bases de datos Springer y Elsevier, respectivamente. Por tanto, los estudios bibliométricos se llevaron a cabo utilizando los buscadores Scopus y Web Of Science (en adelante, WOS).

Para que las búsquedas fuesen los más pertinentes posibles, los campos seleccionados fueron “título + resumen + palabras clave” en el caso de Scopus y “tema” en el caso de WOS.

El buscador WOS no permite buscar artículos según el campo “título + resumen + palabras clave”, por lo que las búsquedas se realizaron utilizando el campo “tema”, que es el que se asemeja en mayor medida, puesto que, además de buscar en título, resumen y palabras clave, también lo hace en “*Keywords Plus*”, una patente de WOS.

3.1 Estudios preliminares

Inicialmente, se compararon el número de artículos que contienen la palabra “*lead*” en el campo “título” entre las plataformas de búsqueda Scopus y WOS para el intervalo de tiempo seleccionado (desde 2012 hasta 2022). Adicionalmente, en este mismo campo, se estudió la presencia de los términos “*lead AND Pb*” y, también, se efectuó esta misma búsqueda en los campos “título + resumen + palabras clave” en Scopus y “tema” en WOS.

3.2 Estudios de compartimentos ambientales que contamina el plomo

Posteriormente, se llevó a cabo una serie de búsquedas más exhaustivas con el objetivo de determinar el número de publicaciones que estudian la presencia de plomo en aire, aguas y suelos. Para maximizar la pertinencia de estos rastreos, se emplearon las siguientes expresiones, buscando los compartimentos ambientales por separado y combinados:

- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND water NOT (soil OR air)*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND soil NOT (water OR air)*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND air NOT (water OR soil)*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND water AND soil NOT air*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND water AND air NOT soil*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND soil AND air NOT water*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND water AND soil AND air*

3.3 Estudio de fuentes antropogénicas de emisión de plomo

El siguiente paso fue rastrear las publicaciones enfocadas al estudio de las fuentes de emisión de plomo citadas en el *Apartado 1. Introducción*, referidas a combustibles, minería, pinturas y tuberías de conducción sanitaria. Para ello, se manejaron las expresiones:

- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND fuel*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND mining*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND (tubing OR piping)*
- *(lead AND Pb) AND (pollution OR contamination) AND (paint OR dye)*

3.4 Estudio de técnicas de análisis y determinación de plomo

En este apartado se determinó el número de artículos publicados referidos a las técnicas de análisis de plomo más relevantes. Como referencia, se consultó el documento de Tesis Doctoral de (Muñoz Lucas, 2012). Las técnicas seleccionadas fueron: Espectroscopía de Absorción Atómica de Llama (FAAS), Espectroscopía de Absorción Atómica Electrotérmica (ETAAS), Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), técnicas electroanalíticas (Voltametrías), Fluorescencia de Rayos X (XRF), Microscopía Electrónica de Barrido con Energías Dispersivas de Rayos X (SEM/EDX), Espectrometría Raman y Espectrometría de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR).

A partir de ellas, se efectuaron búsquedas avanzadas en la plataforma Scopus en el campo “título + resumen + palabras clave” y en el campo “tema” en el caso de WOS, para el intervalo de tiempo establecido. Las expresiones empleadas fueron las siguientes:

- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Flame Atomic Absorption Spectroscopy" OR "FAAS")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Electrothermal Atomic Absorption Spectroscopy" OR "ETAAS" OR "Graphite Furnace Atomic Absorption Spectroscopy" OR "GFAAS")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Inductively coupled Plasma Mass Spectrometry" OR "ICP-MS")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy" OR "ICP-OES")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Electroanalytical" OR "Voltammetry")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("X-Ray Fluorescence" OR "XRF")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Scanning Electron Microscopy" OR "SEM/EDS")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Raman spectroscopy")*
- *(lead AND Pb) AND ("determination" OR "detection" OR "analysis") AND ("Fourier Transform Infrared Spectrometry" OR "FTIR")*

3.5 Estudio de métodos de eliminación de plomo

Finalmente, se analizaron las publicaciones referidas a técnicas de eliminación de plomo. Se rastreó en Scopus en el campo título + resumen + palabras clave siguiendo la expresión “(lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation)”. Una vez llevada a cabo la búsqueda, se tuvo como referencia el artículo de revisión publicado por (Kumar, V., Dwivedi, S. K. and Oh, 2022), quinto más citado en la plataforma Scopus entre los publicados en 2022. A partir de él, se seleccionaron los métodos de eliminación: coagulación/floculación, técnicas electroquímicas, procesos fotocatalíticos, filtración por membrana, adsorción, biorremediación y precipitación. Las búsquedas de las técnicas se realizaron manera individual empleando las siguientes expresiones:

- (lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation) AND (coagulation OR flocculation)
- (lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation) AND (electrodialysis OR electrolysis OR electrodeposition)
- (lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation) AND photocatal*
- (lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation) AND membrane
- (lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation) AND adsorption
- (lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation) AND bioremediation
- (lead AND Pb) AND (removal OR elimination OR remediation) AND precipitation

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez diseñadas las búsquedas, se aplicaron con el fin de evaluar los resultados arrojados y establecer una comparativa entre ambos buscadores, Scopus y WOS, en los diferentes ámbitos del estudio. Cabe indicar que, en todos los casos, un incremento en el número de publicaciones relacionadas con el plomo implica un mayor interés científicos por este metal.

4.1 Estudios preliminares

En este apartado, se efectuó una búsqueda de publicaciones con el término “lead” en el campo “título”. La elección de rastrear en este campo se debe a que la búsqueda del término “lead” en el texto podría devolver demasiados resultados no pertinentes. Los resultados obtenidos para el intervalo de tiempo estudiado se muestran en la Figura 3.

Como se aprecia en la Figura 3, la plataforma WOS aporta un mayor número de artículos que Scopus en todos los años de estudio. Además, para ambas plataformas, la tendencia en el

número de publicaciones es ascendente, aunque a partir del año 2020 el ascenso parece moderarse e, incluso, en el caso de WOS, el número de artículos disminuye en el último año.

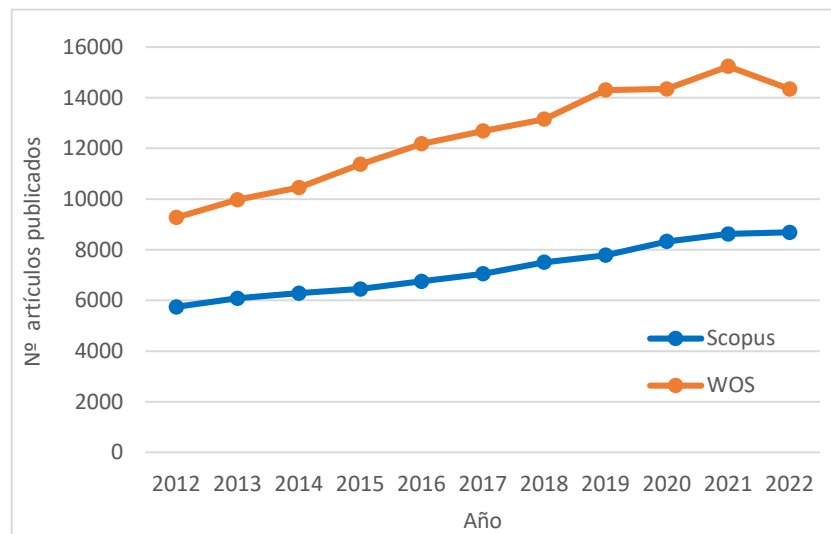


Figura 3. Número de artículos publicados anualmente que incluyen el término "lead" en el campo "título" en Scopus y WOS. Fuente: elaboración propia.

Analizando los resultados, se puso de manifiesto una sobreestimación exagerada de los mismos. Se determinó que esto era debido a otra acepción de "lead", cuyo significado en inglés es "conducir, dirigir", lo que provoca que una gran parte de los artículos seleccionados a través de la expresión de búsqueda elegida no hablan de plomo. Para corregir dicho error, se planteó modificar la expresión a "lead AND Pb" realizando la búsqueda en el campo "título". A continuación, la Figura 4 ilustra los resultados obtenidos mediante la nueva expresión.

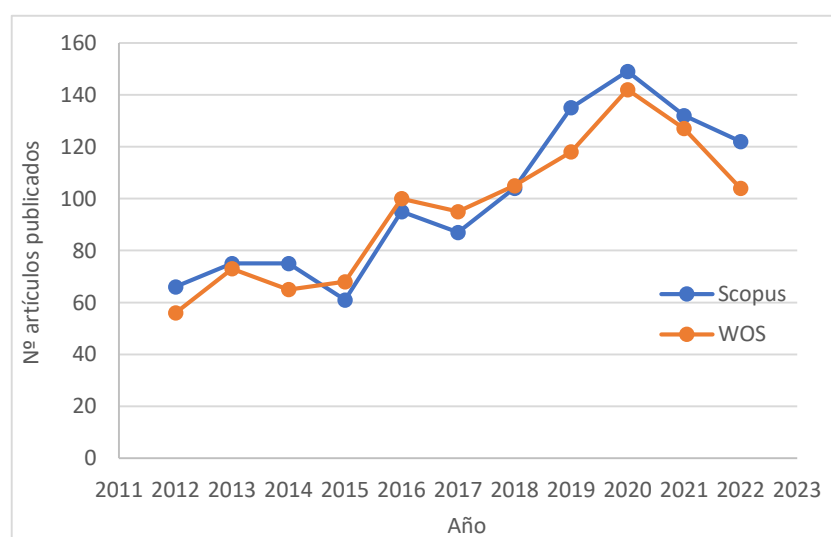


Figura 4. Número de artículos publicados anualmente que incluyen los términos "lead AND Pb" en el campo "título" en Scopus y WOS. Fuente: elaboración propia.

Observando los resultados de la Figura 4 se ve que el número de artículos publicados ha descendido drásticamente respecto a la búsqueda anterior. Esto podría deberse a la dificultad de encontrar artículos que presenten en su título tanto el término “lead” como su símbolo “Pb”. Por este motivo, se descartó la opción de rastrear los artículos buscando “lead AND Pb” en el campo “título”.

Como alternativa, se planteó emplear la expresión “lead AND Pb” introducida en el campo “título + resumen + palabras clave” para la plataforma Scopus y en el campo “tema” para la plataforma WOS. Los resultados de esta nueva búsqueda se recogen en la Figura 5.

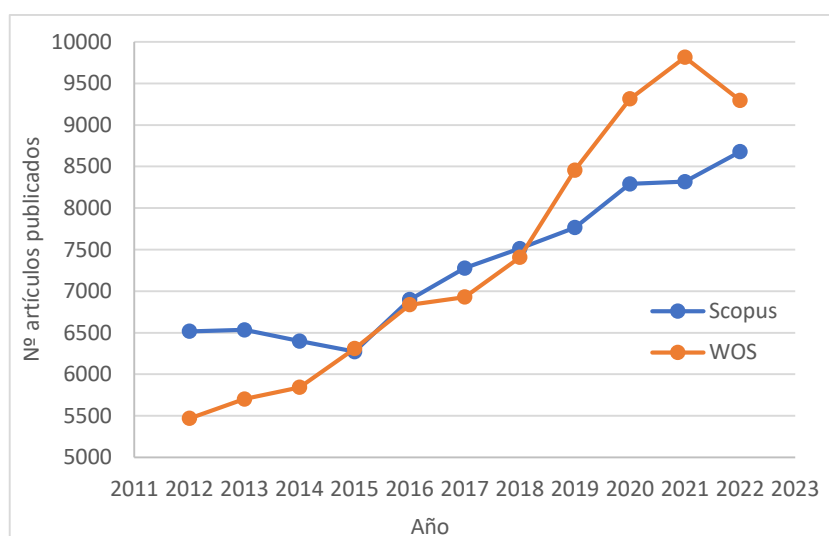


Figura 5. Número de artículos publicados anualmente que incluyen los términos “lead AND Pb” en el campo “título + resumen + palabras clave” en Scopus y “tema” en WOS. Fuente: elaboración propia.

La Figura 5 indica que la tendencia en el número de publicaciones anuales es ascendente en WOS hasta 2021, año en el que decrece. Para el caso de Scopus, durante los primeros años de estudio (2012-2015), la tendencia fue ligeramente descendente destacando el año 2014, si bien podría considerarse que el número de publicaciones se mantuvo relativamente estable puesto que la diferencia es pequeña. En años posteriores, aumentó progresivamente.

Cabe destacar que, hasta 2015, la plataforma que arrojaba mayor número de resultados fue Scopus y, a partir de 2018, esta situación se invierte. Se constata, por tanto, que el número de revistas recogidas en WOS dedican, actualmente, más atención a aspectos relativos al plomo. La explicación de este hecho requeriría de un estudio más profundo, aunque podría deberse a que el número de revistas recogidas en las bases de datos de WOS dedican, actualmente, más atención a aspectos relacionados con el plomo.

4.2 Estudios de compartimentos ambientales que contamina el plomo

Por otra parte, se relacionaron el número de artículos publicados referidos a la contaminación generada por el plomo y los diferentes compartimentos ambientales en los que se estudia su contaminación: el suelo, el agua y el aire (Fig. 6). Asimismo, se han buscado artículos que tratan, de manera simultánea, combinaciones de estos compartimentos, tanto binarias como las tres matrices ambientales.

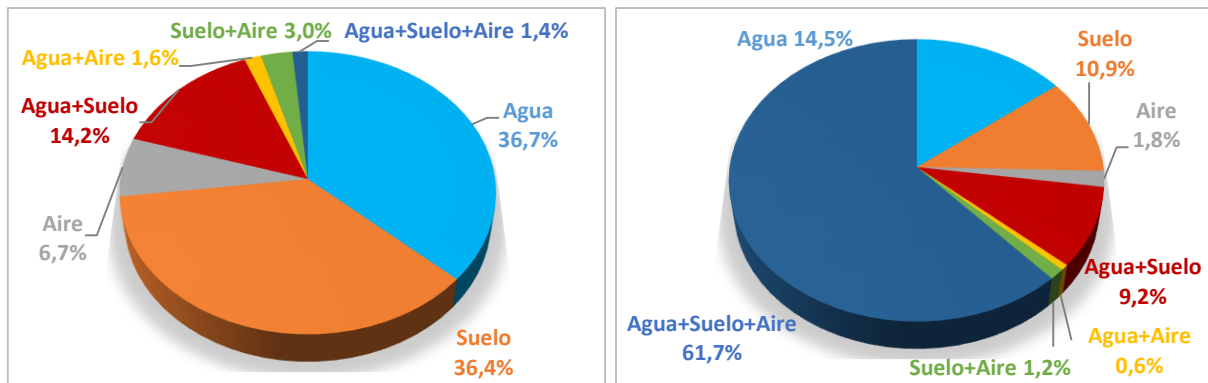


Figura 6. Diagrama de sectores de las publicaciones rastreadas por (A) Scopus y (B) WOS, referidas a los diferentes compartimentos ambientales en los que está presente el plomo. Fuente: elaboración propia.

Como se pone de manifiesto en la Figura 6.A, un gran porcentaje de las publicaciones están dirigidas a la presencia de plomo, tanto en agua (36.7%) como en suelo (36.4%) de manera individual. Además, la combinación de ambas es la tercera matriz ambiental sobre la que existe un mayor número de artículos publicados (14.2%). A continuación, se encuentra aire (6.7%) y finalmente, encontramos el suelo + aire (3.0%), el agua + aire (1.6%) y el agua + suelo + aire (1.4%) como matrices ambientales con un menor aporte de publicaciones.

Para WOS, como muestra el diagrama de sectores (Fig. 6.B), los resultados difieren en cuanto a que el mayor número de publicaciones se centran en la presencia de plomo en las tres matrices ambientales (agua + suelo + aire), representando un 61.7%. Este porcentaje tan elevado podría deberse al funcionamiento interno de WOS: en el campo “tema”, WOS incluye título, resumen, palabras clave y una patente conocida como “*KeyWords Plus*”. Esta última permite buscar palabras clave adicionales, escogidas por WOS y que estén relacionadas con las palabras clave del artículo. Por ello, es probable que, cuando se introducen dos de esas matrices ambientales, “*Keywords Plus*” incorpora la restante al rastreo. Consecuentemente, el número de publicaciones encontradas no será representativo para esta expresión en concreto.

El segundo compartimento ambiental acerca del que se han encontrado más estudios es el agua y el suelo, con un 14.5% y 10.9%, respectivamente. A continuación, aparece el agua +

suelo (9.2%) y, finalmente, en menor medida, aire (1.8%), suelo + aire (1.2%), agua + aire (0.6%). Adicionalmente, se representó en una gráfica de sectores el porcentaje de publicaciones, para ambas plataformas, referidas a la contaminación por plomo en diferentes matrices ambientales, obviando la opción agua + suelo + aire. Los resultados se muestran en la Figura S1 del *Anexo*. Como puede observarse, la tendencia en ambas plataformas es la misma.

Una vez analizados los resultados obtenidos para los dos buscadores, se procedió a realizar una comparación entre ambos, descartando la búsqueda en agua + suelo + aire (Fig. 7).

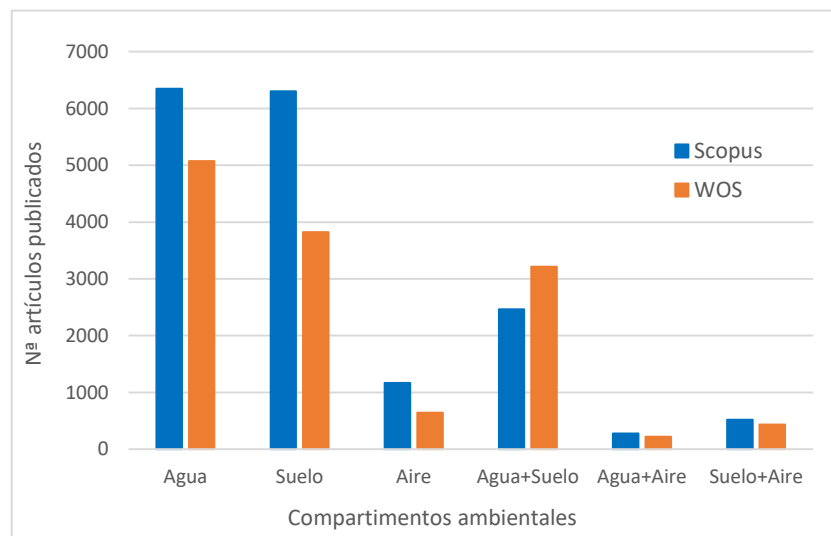


Figura 7. Comparación entre el número total de artículos, publicados en el intervalo de tiempo estudiado, proporcionados por Scopus y WOS, referidos a los distintos compartimentos ambientales en los que está presente el plomo. Fuente: elaboración propia.

A la vista de la figura, se observa que Scopus aporta un mayor número de publicaciones que WOS para todas las matrices ambientales estudiadas, tanto de forma individual como combinadas exceptuando la opción agua + suelo. Tal y como se indicó anteriormente, esto puede ser debido al funcionamiento de las “*KeyWords Plus*” de la plataforma WOS.

Los resultados ponen de manifiesto que tanto el agua como el suelo constituyen los dos compartimentos ambientales que más relevancia tienen en cuanto a los estudios relativos a la contaminación por plomo. Esto es debido a que las especies predominantes de plomo se presentan solubilizadas o precipitadas en forma de minerales (Li *et al.*, 2014; Islam *et al.*, 2015). Por otro lado, y a pesar de que el plomo puede encontrarse en el aire en forma de especies volátiles o sólidos particulados procedentes de diferentes fuentes, estas especies precipitan rápidamente (Hu *et al.*, 2012), por lo que el número de estudios de la contaminación del aire por plomo es considerablemente menor, incluso comparado con la combinación agua + suelo.

Para finalizar este, se analizó el número de artículos publicados anualmente en cada matriz ambiental y sus respectivas combinaciones, retirando agua + suelo + aire. Los resultados se recogen en la Figura 8.

Como se observa en ambas gráficas, y se constató anteriormente, el número de publicaciones aumenta en el intervalo de tiempo estudiado, excepto para el caso de WOS en el año 2019, en el que el número de estudios relativos al plomo en los compartimentos ambientales agua y suelo disminuyen, aumentando simultáneamente su combinación (agua + suelo).

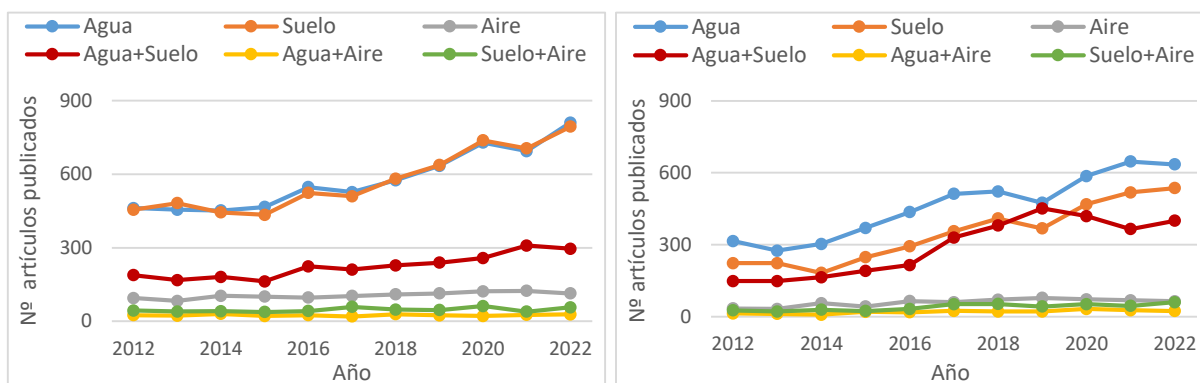


Figura 8. Número de artículos publicados anualmente para las diferentes matrices ambientales en las que se encuentra el plomo en (A) Scopus y (B) WOS. Fuente: elaboración propia.

4.3 Estudio de fuentes antropogénicas de emisión de plomo

En este apartado, se trató de evaluar el número de artículos referidos a la contaminación por plomo en función de sus fuentes antropogénicas de emisión. Se seleccionaron como fuentes de emisión la minería, los combustibles, las pinturas y las tuberías de conducción sanitaria. En la Figura 9 se comparan los resultados obtenidos para las plataformas estudiadas.

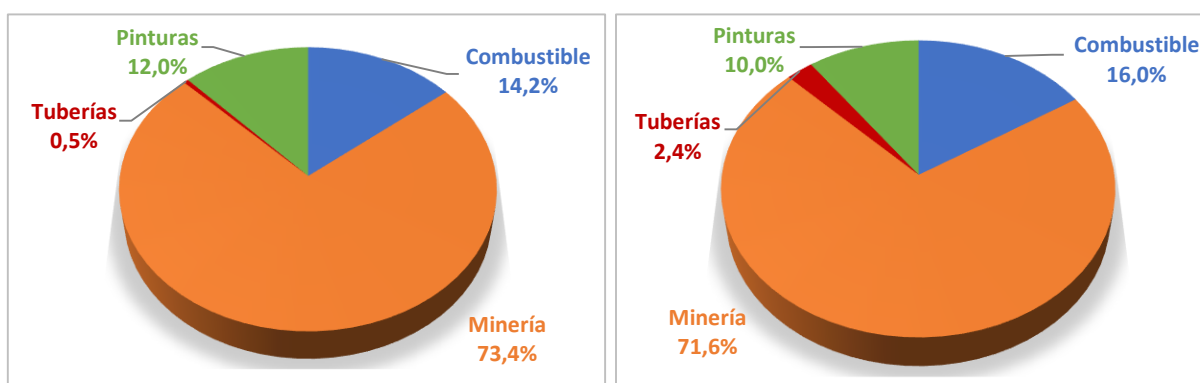


Figura 9. Diagrama de sectores de las publicaciones rastreadas por (A) Scopus y (B) WOS, referidas a las principales fuentes antropogénicas de emisión de plomo. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 9, la mayor parte de los artículos referidos a las fuentes antropogénicas de plomo se centra en la minería, citada en el 73.4% de los artículos totales en el caso de Scopus y 71.6% en WOS. Esto puede deberse a que la extracción de minerales de plomo es una actividad tradicional que en la actualidad se sigue practicando. Además de por esta razón, el gran número de publicaciones que ocupa la minería puede deberse a la gran superficie que abarcan estas explotaciones en relación a las otras fuentes tratadas, las cuales se encuentran alrededor de zonas urbanas principalmente (Zhuang *et al.*, 2009; Acosta *et al.*, 2011). Tras la minería, las fuentes antropogénicas más estudiadas son los combustibles (14.2% para Scopus y 16.0% para WOS) y las pinturas (12.0% para Scopus y 10.0% para WOS).

Finalmente, se ha determinado que las tuberías de conducción sanitarias representan el menor porcentaje de publicaciones referidas a las fuentes de emisión de plomo, estando presente en un 0.5% de las publicaciones de Scopus y un 2.4% de las rastreadas por WOS. Estos porcentajes tan bajos se deben a los pocos estudios llevados a cabo para estimar la ingesta de agua del grifo relacionándola con la concentración de plomo del agua (Jarvis *et al.*, 2018).

A continuación, se realizó una comparación entre motores de búsqueda en cuanto al número de artículos publicados para cada fuente antropogénica de emisión (Fig. 10).

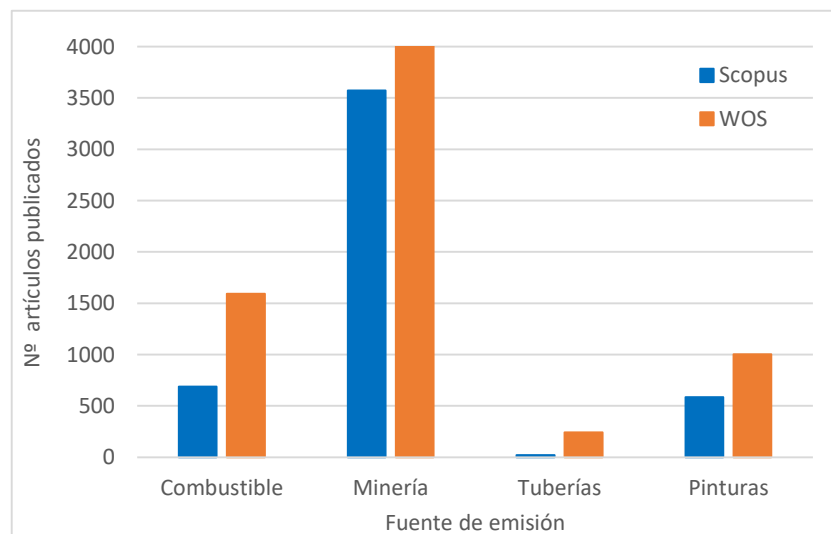


Figura 10. Comparación entre el número total de artículos, publicados en el intervalo de tiempo estudiado, proporcionados por Scopus y WOS, referidos a las distintas fuentes antropogénicas de emisión de plomo. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 10, la plataforma WOS aporta un mayor número de artículos para todas las fuentes contaminantes estudiadas, lo que podría indicar que Scopus recoge información relacionada, especialmente con estos aspectos.

Finalmente, se evaluó el número de artículos publicados anualmente para cada fuente antropogénica de emisión y base de datos (Fig. 11). Como se pone de manifiesto en esta figura, tanto en Scopus como en WOS existe una tendencia ascendente en el número de artículos publicados relativos a la minería, a los combustibles y a las pinturas como fuentes de plomo, aunque la curva se estabiliza a partir del año 2018, incluso desciende, en el caso de la minería para la plataforma WOS a partir de 2020. En cuanto a las tuberías de conducción sanitarias, el número de estudios se ha mantenido estable en el periodo de tiempo evaluado. El aumento del número de publicaciones para el caso de la minería es mayor al del resto de fuentes de emisión, especialmente en el intervalo entre 2007 y 2009 para Scopus y en el año 2020 para WOS. Esto puede deberse a un aumento en la producción de baterías de plomo-ácido utilizadas en los sistemas de arranque y parada de automóviles ya que gran parte del plomo extraído de las minas se utiliza como componente en éstas (Gao *et al.*, 2023).

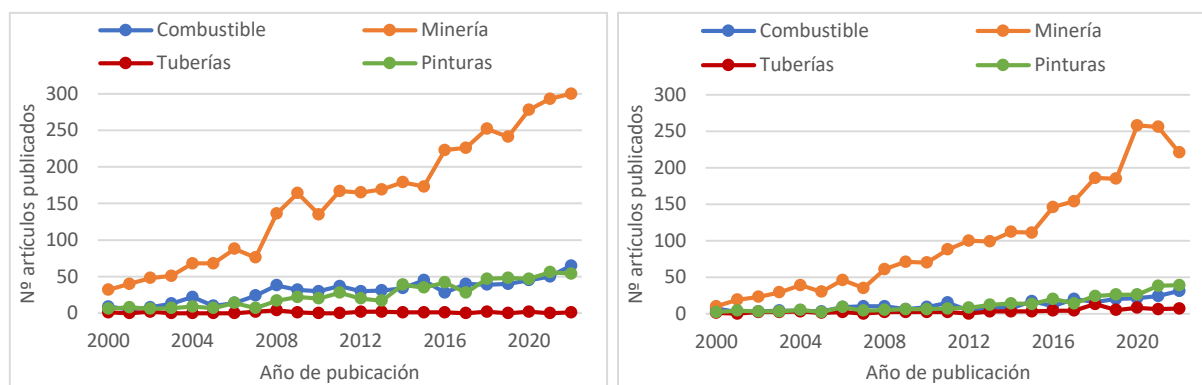


Figura 11. Número de artículos publicados anualmente para las diferentes fuentes de emisión en (A) Scopus y (B) WOS. Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, para este estudio se amplió el intervalo de tiempo estudiado, desde el 2000 hasta el 2022, con el fin de comprobar si en los años más próximos a la prohibición de emisión de plomo a través de los combustibles, las pinturas y las tuberías, el número de artículos publicados fue mayor. Como muestra la Figura 11, esto no se evidencia, puesto que en esos años el número de publicaciones fue menor, esto podría deberse a que en la actualidad existe un mayor control y seguimiento de las emisiones antropogénicas de plomo lo que provoca que haya más cantidad de estudios respecto a inicios del siglo XXI.

4.4 Estudio de técnicas de análisis y determinación de plomo

En este apartado se estudiaron las técnicas de análisis y determinación de plomo más empleadas. En este punto, se tomó como referencia la Tesis Doctoral de Muñoz Lucas, M.I. (2012), a partir de la cual se seleccionaron las siguientes técnicas analíticas: Espectroscopía de

Absorción Atómica de Llama (FAAS), Espectroscopía de Absorción Atómica Electrotérmica (ETAAS), Espectrometría de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-MS), Espectroscopía de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES), técnicas electroanalíticas (Voltametrías), Fluorescencia de Rayos X (XRF), Microscopía Electrónica de Barrido con Energías Dispersivas de Rayos X (SEM/EDX), Espectrometría Raman y Espectrometría de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR). Los resultados obtenidos para ambos buscadores se recogen en la Figura 12.

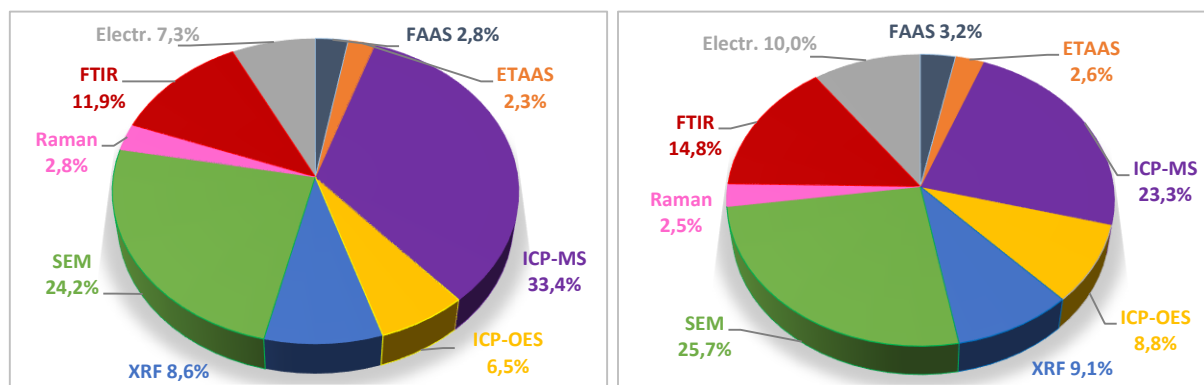


Figura 12. Diagrama de sectores de las publicaciones rastreadas por (A) Scopus y (B) WOS, referidas a las principales técnicas de análisis y determinación de plomo. Fuente: elaboración propia.

Como se observa en la Figura 12, tanto los artículos rastreados por Scopus como WOS presentan una distribución similar en cuanto a técnicas analíticas de determinación de plomo. Así, el ICP-MS constituye la técnica más empleada a la hora de analizar este metal (33.4% y 23.3% en Scopus y WOS, respectivamente). Los resultados muestran que el SEM/EDX es la siguiente técnica más utilizada (24.2% y 25.7%), seguida de FTIR (11.9 y 14.8%).

Las siguientes técnicas analíticas más citadas son XRF (8.6% en Scopus y 9.1% en WOS), las técnicas electroanalíticas (7.3% y 10.0%) e ICP-OES (6.5% y 8.8%). Finalmente, la espectrometría Raman, FAAS y ETAAS son minoritarias en los estudios de determinación de plomo, representando, entre todas, un porcentaje menor del 7% para el caso de Scopus y menor del 9.1% para el caso de WOS.

Las técnicas espectrométricas de masas (ICP-MS) son, actualmente, las más empleadas, como apuntan los resultados anteriormente mencionados (Tokalioğlu, 2012). Esto es así puesto que se trata de la técnica más sensible y que permite identificar un elevado número de analitos de manera simultánea y con una menor interferencia espectral (es decir, tiene una gran

selectividad) (Tokalioğlu, 2012; Khan *et al.*, 2014; Trzcinka-Ochocka, M., Brodzka and Janasik, 2016).

Las técnicas electroanalíticas, especialmente las voltametrías, son de gran interés para la determinación a niveles traza tanto de cationes metálicos, especialmente metales pesados, como de compuestos orgánicos (Pereira *et al.*, 2016). Esta elevada sensibilidad, unida a que se trata de técnicas que se efectúan con el mismo equipamiento (potenciostato/galvanostato), que es muy versátil y económico, hacen que se desarrollen muchos métodos analíticos de metales pesados en concentraciones traza en muchos laboratorios de investigación.

Por su parte, el empleo del ICP-OES para cuantificar plomo es similar que las técnicas electroanalíticas. Esto se debe, además de a su sensibilidad, a que es una técnica de emisión atómica multielemento, es decir, permite analizar, de manera simultánea, varios analitos presentes en la misma muestra (Sereshti *et al.*, 2012), lo que suele ser común en estudios ambientales. Finalmente, las técnicas de absorción atómica (FAAS y ETAAS), ampliamente utilizadas para la determinación analítica de metales en las últimas décadas del siglo XX, han visto reducido su empleo drásticamente, debido a su falta de selectividad y a la aparición de perturbaciones en los resultados (Sardans *et al.*, 2010).

Por otra parte, es importante señalar que ciertas técnicas analíticas estudiadas en este TFG, como son SEM/EDX, Espectrometrías Raman y FTIR y XRF, se emplean principalmente para caracterizar materiales, puesto que el análisis cuantitativo con ellas es problemático (bajas sensibilidades, métodos semicuantitativos, etc.) (Abadllah *et al.*, 2020). Tras una revisión de los artículos seleccionados por los buscadores, se comprobó que una gran parte de estas técnicas se empleaba en la caracterización de materiales para la adsorción de plomo, no para la determinación de este metal. Por este motivo, se decidió representar el porcentaje de publicaciones relativas a las técnicas analíticas ICP-MS, ICP-OES, FAAS, ETAAS y técnicas electroanalíticas, generándose la Figura S2 (*Apartado 7. Anexos*).

Observando la Figura S2 se observa cómo el porcentaje de todas las técnicas analíticas aumenta respecto a la Figura 12, como cabía esperar. Esto se debe a la exclusión del estudio a las técnicas analíticas SEM/EDX, Espectrometrías Raman y FTIR y XRF. Respecto a las técnicas estudiadas en la Figura S2, el ICP-MS es la citada en un mayor número de publicaciones (63.7% en Scopus y 48.7% en WOS) seguida de las técnicas electroanalíticas (14.0% en Scopus y 20.8% en WOS) y de la ICP-OES (12.4% en Scopus y 18.4% en WOS). Finalmente, al igual que ocurría en la Figura 12, las técnicas analíticas menos utilizadas son

FAAS (5.4% en Scopus y 6.7% en WOS) y ETAAS (4.5% en Scopus y 5.4% en WOS) aunque su porcentaje respecto al total es mayor que en el caso del estudio anterior.

A continuación, se comparó el número de publicaciones referidas a las distintas técnicas de análisis y determinación de plomo en Scopus y WOS, retirando los resultados relativos a las técnicas de caracterización (Fig. 13). La Figura 13 permite comprobar que, para todas las técnicas analíticas, excepto ICP-MS, el número de publicaciones rastreadas es mayor en el buscador WOS. Sin embargo, y como se comentó anteriormente, la tendencia es similar para ambas plataformas. Además, se percibe claramente el gran aporte de publicaciones de la técnica ICP-MS respecto al resto de técnicas estudiadas.

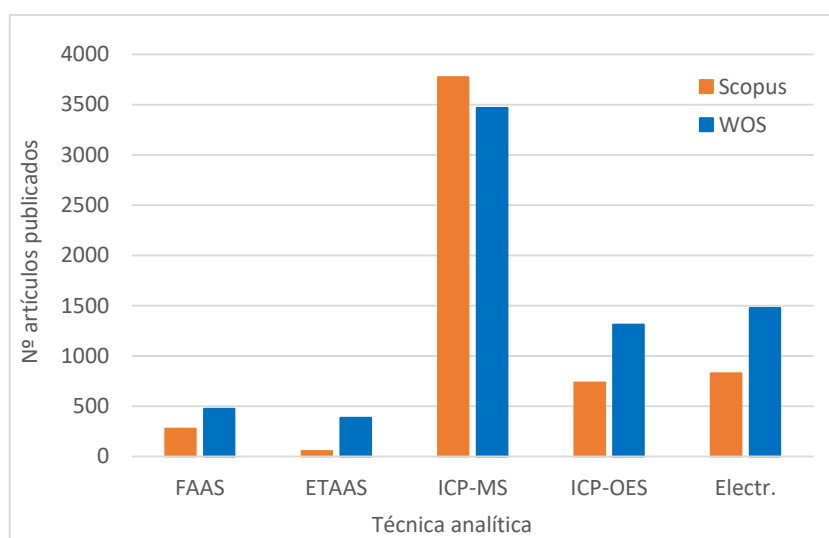


Figura 13. Comparación entre el número total de artículos, publicados en el intervalo de tiempo estudiado, proporcionados por Scopus y WOS, referidos a las distintas técnicas de análisis y determinación de plomo. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se llevó a cabo un estudio (Fig. 14) con el objetivo de analizar el número de artículos publicados anualmente para cada técnica analítica. Se han retirado las técnicas de caracterización mencionadas anteriormente para una mejor visualización de la figura.

De esta figura se deduce que, para la mayoría de las técnicas analíticas, el número de publicaciones en ambas plataformas se ha mantenido estable o ha crecido ligeramente. Sin embargo, para la técnica de ICP-MS, la tendencia es diferente, puesto que se aprecia un claro crecimiento en el intervalo de tiempo estudiado, aunque en la plataforma Scopus la curva se estabiliza a partir del año 2018 mientras que en WOS el aumento es mayor exceptuando el último año de estudio donde hay un descenso del número de publicaciones. Esto concuerda con lo indicado previamente, reafirmando que dicha técnica es la más empleada actualmente.

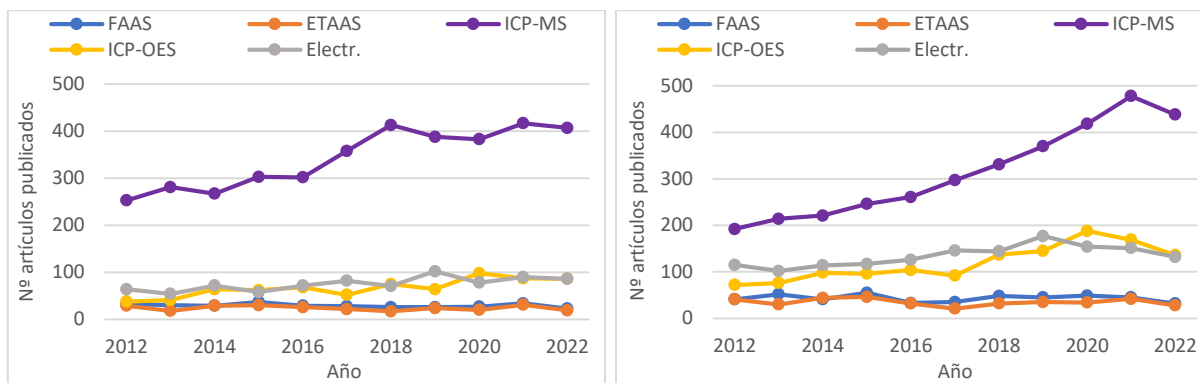


Figura 14. Número de artículos publicados anualmente para las diferentes técnicas de análisis y determinación de plomo en (A) Scopus, y (B) WOS. Fuente: elaboración propia.

4.5 Estudio de métodos de eliminación de plomo

Finalmente, este estudio consistió en evaluar el número de contribuciones científicas relacionadas con los métodos de eliminación de plomo. Para ello, se tomó como referencia el artículo de revisión bibliográfica publicado por Kumar, Dwivedi y Oh (2022), ampliamente citado y publicado en una revista de contrastado prestigio, a partir del cual se escogieron diferentes métodos de eliminación de plomo: coagulación/floculación, técnicas electroanalíticas, procesos fotocatalíticos, filtración por membrana, adsorción, biorremediación y precipitación.

En primer lugar, se evaluó el porcentaje de trabajos científicos relativos a los métodos de eliminación de plomo del medio ambiente, como se recoge en la Figura 15.

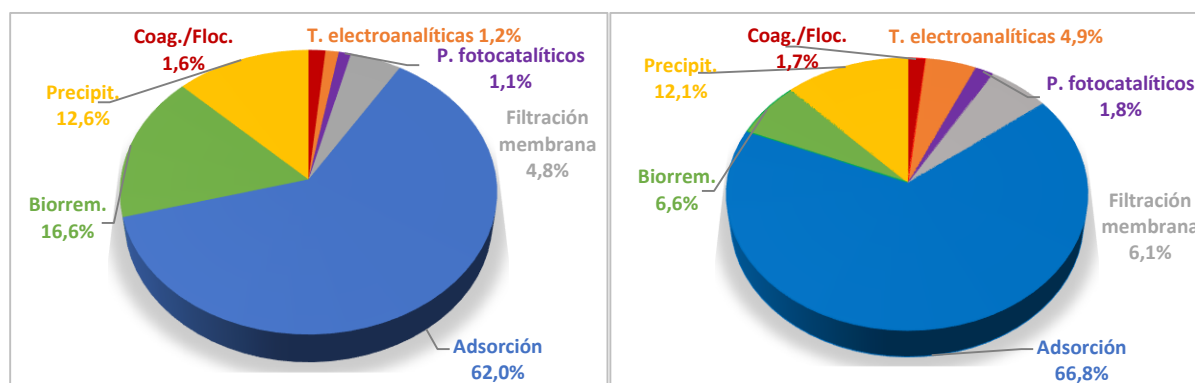


Figura 15. Diagrama de sectores de las publicaciones rastreadas por (A) Scopus, y (B) WOS, referidas a los principales métodos de eliminación de plomo. Fuente: elaboración propia.

Como se ilustra en estos diagramas de sectores, el método de eliminación de plomo más estudiado en los últimos diez años es la adsorción (62.0% en Scopus y el 66.8% en WOS). Esto se debe a que los materiales adsorbentes se caracterizan por poseer una alta porosidad, lo que se traduce en una elevada área superficial: consecuentemente, expone más superficie a la

disolución y dispone de más sitios de unión al contaminante, favoreciendo la efectividad de su eliminación (Tahoon, Siddeeg and Alsaari , 2020) Además de esto, es una técnica limpia, de diseño simple y de fácil operación (Velarde *et al.*, 2023). Por todo ello, el desarrollo de investigaciones orientadas al diseño y preparación de nuevos adsorbentes está a la orden del día.

A continuación, el método de precipitación es el más empleado para la plataforma WOS (12.1%) mientras que en el caso de Scopus el segundo más citado es el de biorremediación (16.6%). Desde el punto de vista medioambiental, la biorremediación es un proceso limpio, económico, sencillo y que demanda poca energía que aprovecha la capacidad que tienen algunos seres vivos, principalmente hongos, bacterias y plantas, para movilizar o inmovilizar el plomo (Lovley and Coates, 1997) mientras que la precipitación química genera una mayor cantidad de residuos en forma de sales insolubles (Zeng *et al.*, 2017).

A continuación, como tercer método más citado en WOS aparece biorremediación (6.6%), seguida de filtración por membrana (6.1%), mientras que en Scopus la tercera técnica más citada es la precipitación (12.6%) y, posteriormente, filtración por membrana (4.8%). Para finalizar, en ambas plataformas aparecen como métodos menos utilizados los electroquímicos (1.2% en Scopus y 4.9% en WOS), los procesos fotocatalíticos (1.1% en Scopus y 1.8% en WOS) y el método coagulación/floculación (1.6% en Scopus y 1.7% en WOS).

Seguidamente, se procedió a comparar el número de artículos publicados en cada buscador para los diferentes métodos de eliminación (Fig. 16).

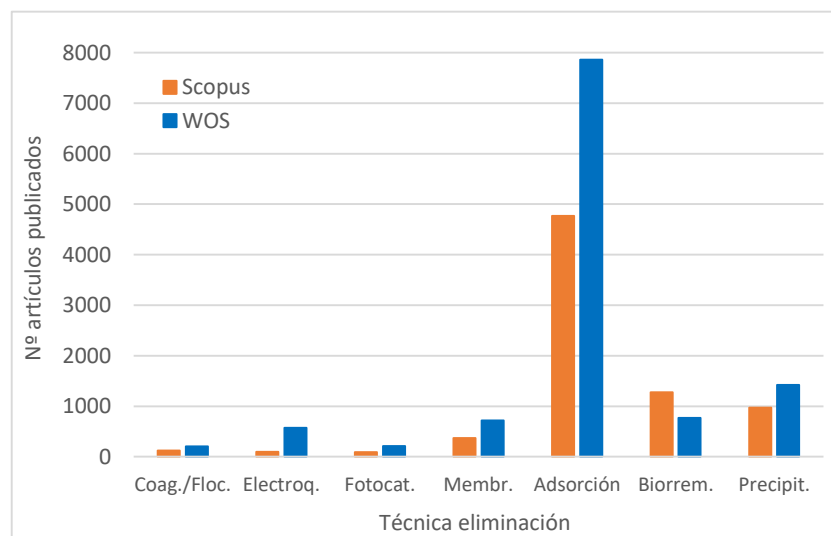


Figura 16. Comparación entre el número total de artículos, publicados en el intervalo de tiempo estudiado, proporcionados por Scopus y WOS, referidos a los métodos de eliminación de plomo. Fuente: elaboración propia.

Observando la Figura 16, se constata que WOS aporta un número mayor de artículos que Scopus para todos los métodos estudiados exceptuando para la biorremediación. En el caso del método adsorción se percibe una gran diferencia de publicaciones entre WOS y Scopus mientras que en el resto de métodos la diferencia no es tan grande. Además, se percibe con claridad la diferencia de artículos aportados por el método de adsorción respecto al resto.

Finalmente, en la Figura 17 se analizó el número de publicaciones anuales para cada método de eliminación de plomo y para cada plataforma de búsqueda.

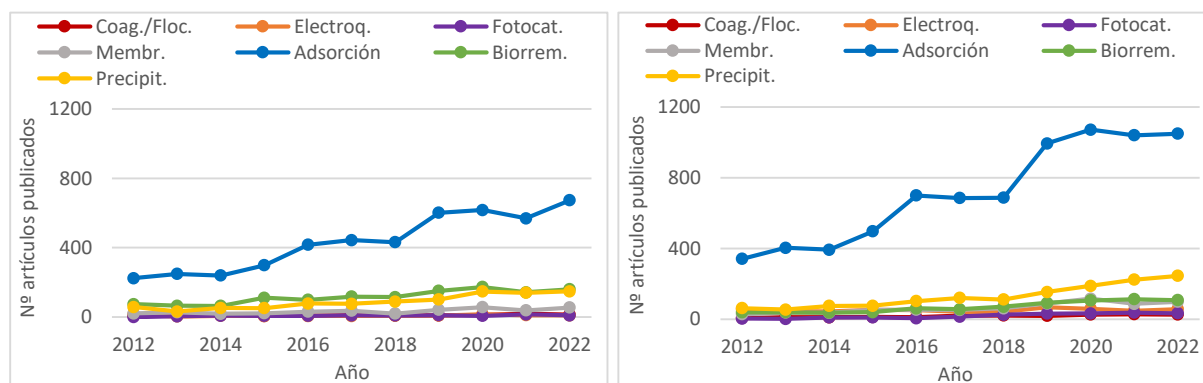


Figura 17. Número de artículos publicados anualmente para las diferentes técnicas de eliminación de plomo en (A) Scopus, y (B) WOS. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 17 se percibe, como en el resto de estudios, un ascenso en el número de artículos en el intervalo de tiempo. Dicho ascenso sigue el mismo patrón para todos los métodos excepto para la adsorción, donde la curva de ascenso tiene mayor pendiente, aunque comienza a estabilizarse a partir del año 2019. Pese a la tendencia ascendente, para el método adsorción existen intervalos de tiempo en los cuales la curva se estabiliza, por ejemplo, entre los años 2016 y 2018 en ambas plataformas o entre 2021 y 2022 en WOS.

Cabe destacar la diferencia en las tendencias de los métodos de precipitación y biorremediación para cada buscador. En el caso de *Scopus* ambos métodos siguen una tendencia similar siendo en todo caso el método de biorremediación el más citado para todos los años de estudio. En el caso de WOS, el método de precipitación aporta un mayor número de publicaciones, además, sigue una tendencia ascendente a lo largo del intervalo de estudio mientras que la biorremediación se mantiene estable.

5 CONCLUSIONES

Una vez llevados a cabo los diferentes estudios y discutidos sus resultados, se pueden extraer una serie de conclusiones:

1. Los diferentes estudios bibliométricos llevados a cabo indican que existe una tendencia ascendente en cuanto al número de artículos publicados a lo largo del intervalo de estudio, aunque a partir del año 2020 se detecta una mayor estabilidad en el número de publicaciones.
2. Se ha identificado que la plataforma WOS aporta un mayor número de publicaciones que la plataforma Scopus para todos los estudios llevados a cabo exceptuando la presencia de plomo en los diferentes compartimentos ambientales, donde ocurre lo contrario. Esto podría deberse a que WOS, además de “título + resumen + palabras clave”, busca también en “*Keywords Plus*”, que introduce más resultados.
3. En cuanto a la presencia de plomo en diferentes compartimentos ambientales, la gran parte de las publicaciones hablan de la contaminación de plomo en el agua, en el suelo y en ambos compartimentos combinados, principalmente. Por otra parte, la fuente antropogénica de emisión de plomo más estudiada en la literatura científica es la minería.
4. Se ha observado que, para el intervalo de tiempo estudiado, el ICP-MS es la técnica de determinación de plomo más empleada. Asimismo, la técnica de adsorción es la más utilizada para su eliminación.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Abadllah, B., Assfour, B., Kakhia, M. and Bumajdad, A. (2020) "HRTEM, XPS and XRD characterization of ZnS/PbS nanorods prepared by thermal evaporation technique", *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 11(5), pp. 537–545.
- Acosta, J. A., Faz, A., Martínez-Martínez, S., Zornoza, R., Carmona, D. M. and Kabas, S. (2011) "Multivariate statistical and GIS-based approach to evaluate heavy metals behavior in mine sites for future reclamation", *Journal of Geochemical Exploration*. Elsevier B.V., 109(1–3), pp. 8–17.
- Alonso Pozuelo, A. (2019) *Estudio bibliográfico de la aplicación de la microextracción dispersiva líquido-líquido en matrices alimentarias para la determinación de pesticidas*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de León.
- Bao, Z., Al, T., Couillard, M., Poirier, G., Bain, J., Shrimpton, H. K., Finfrock, Y. Z., Lanzirotti, A., Paktunc, D., Saurette, E., Hu, Y., Ptacek, C. J. and Blowes, D. W. (2021) "A cross scale investigation of galena oxidation and controls on mobilization of lead in mine waste rock", *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 412, pp. 1–10.

- Blowes, D. et al (2014) "The Geochemistry of Acid Mine Drainage", *Earth Systems and Environmental Sciences*, 11(2), pp. 131–190.
- Brown, G. E., Foster, A. L. and Ostergren, J. D. (1999) "Mineral surfaces and bioavailability of heavy metals: A molecular-scale perspective", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 96(7), pp. 3388–3395.
- Cameo Chemicals (2019) *Lead*. Available at: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/16140> (Accessed: May 12, 2023).
- Gao, X., Zhou, Y., Fan, M., Jiang, M., Zhang, M., Cai, H. and Wang, X. (2023) "Environmental risk assessment near a typical spent lead-acid battery recycling factory in China", *Environmental Research*. Elsevier Inc., 233(May), p. 116417.
- García Arauzo, A. (2019) *Estudio bibliométrico de la presencia de arsénico en el medio ambiente y su liberación. Aplicación de las nanopartículas a la adsorción de arsénico*. Trabajo Fin de Grado. Universidad de León.
- Grupo de Investigación en Ciencia, Educación, M. A. y D. H. (2010) *Dinámica Ambiental de Plomo II*. Available at: <http://gimcead.blogspot.com/2012/04/conferencia-canal-del-dique-un-error.html> (Accessed: July 2, 2023).
- Hamilton, T., Huai, Y., Plackowski, C. and Peng, Y. (2021) "The interactions of radioactive lead with sulphide minerals", *Applied Surface Science*. Elsevier, 538, p. 148141.
- Hu, X., Zhang, Y., Ding, Z., Wang, T., Lian, H., Sun, Y. and Wu, J. (2012) "Bioaccessibility and health risk of arsenic and heavy metals (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn and Mn) in TSP and PM_{2.5} in Nanjing, China", *Atmospheric Environment*. Elsevier Ltd, 57, pp. 146–152.
- Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (2012) *Reducción de la exposición al plomo y al ruido en campos de tiro al aire libre*. Available at: https://www.cdc.gov/spanish/niosh/docs/wp-solutions/2013-104_sp/default.html (Accessed: May 19, 2023).
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah -Al- Mamun, M. and Islam, M. K. (2015) "Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country", *Ecological Indicators*. Elsevier Ltd, 48, pp. 282–291.
- Jarvis, P., Quy, K., Macadam, J., Edwards, M. and Smith, M. (2018) "Intake of lead (Pb) from tap water of homes with leaded and low lead plumbing systems", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 644, pp. 1346–1356.

- Kamenov, G. D., Swaringen, B. F., Cornwell, D. A., McTigue, N. E., Roberts, S. M. and Bonzongo, J. C. J. (2023) "High-precision Pb isotopes of drinking water lead pipes: Implications for human exposure to industrial Pb in the United States", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 871, p. 162067.
- Khan, N., Jeong, I. S., Hwang, I. M., Kim, J. S., Choi, S. H., Nho, E. Y., Choi, J. Y., Park, K. S. and Kim, K. S. (2014) "Analysis of minor and trace elements in milk and yogurts by inductively coupled plasma-mass spectrometry (ICP-MS)", *Food Chemistry*. Elsevier Ltd, 147, pp. 220–224.
- Kumar, V., Dwivedi, S. K. and Oh, S. (2022) "A critical review on lead removal from industrial wastewater: Recent advances and future outlook", *Journal of Water Process Engineering*, 45, p. 102518.
- Lacerda, D., Pestana, I. A., Santos Vergilio, C. dos and de Rezende, C. E. (2023) "Global decrease in blood lead concentrations due to the removal of leaded gasoline", *Chemosphere*, 324.
- Li, Z., Ma, Z., van der Kuijp, T. J., Yuan, Z. and Huang, L. (2014) "A review of soil heavy metal pollution from mines in China: Pollution and health risk assessment", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 468–469, pp. 843–853.
- Link, B., Gabrio, T., Piechotowski, I., Zöllner, I. and Schwenk, M. (2007) "Baden-Wuerttemberg Environmental Health Survey (BW-EHS) from 1996 to 2003: Toxic metals in blood and urine of children", *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 210(3–4), pp. 357–371.
- Lovley, D. R., and Coates, J. D. (1997) "Bioremediation of metal contamination", *Current Opinion in Biotechnology*, 8(3), pp. 285–289.
- Marteles, M. S., Bergua, B. S., Arraiga, B. A. and Cabeza, M. Á. T. (2007) "Intoxicación por plomo", *Medicina Clinica*, 129(15), p. 600.
- Mason, L. H., Harp, J. P. and Han, D. Y. (2014) "Pb neurotoxicity: Neuropsychological effects of lead toxicity", *BioMed Research International*. Hindawi Publishing Corporation, 2014.
- Men, C., Liu, R., Xu, F., Wang, Q., Guo, L. and Shen, Z. (2018) "Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 612, pp. 138–147.
- Meyer, I., Hoelscher, B., Frye, C., Becker, K., Wichmann, H. E. and Heinrich, J. (2003) "Temporal changes in blood lead levels of children in East Germany", *International*

- Journal of Hygiene and Environmental Health*, 206(3), pp. 181–192.
- Ministerio de la presidencia (2003) *Real Decreto 140/2003, de 7 de febrero, por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano*.
- Ministerio para la Transición Ecológica (2023) *Metales pesados*. Available at: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.aspx (Accessed: May 10, 2023).
- Muñoz Lucas, M. . (2012) *Caracterización y acondicionamiento de cenizas volantes para la eliminación de metales pesados en aguas contaminadas*. Tesis Doctoral. Universidad de León.
- Needleman, H. (2004) "Lead poisoning", *Annual Review of Medicine*, 55, pp. 209–222.
- Nikolaychuk, P. A. (2018) "The revised potential – pH diagram for Pb – H₂O system", *Ovidius University Annals of Chemistry*, 29(2), pp. 55–67.
- Nriagu, J. O. (1990) "The rise and fall of leaded gasoline", *Science of the Total Environment*, 92(C), pp. 13–28.
- O'Connor, D., Hou, D., Ye, J., Zhang, Y., Ok, Y. S., Song, Y., Coulon, F., Peng, T. and Tian, L. (2018) "Lead-based paint remains a major public health concern: A critical review of global production, trade, use, exposure, health risk, and implications", *Environment International*. Elsevier, 121, pp. 85–101.
- Organización Mundial de la Salud (2021) *Seguridad química: intoxicación por plomo*. Available at: <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/chemical-safety-lead-poisoning> (Accessed: May 19, 2023).
- Organización Mundial de la Salud (2023) *Constitución*. Available at: <https://www.who.int/es/about/governance/constitution> (Accessed: July 4, 2023).
- Pereira, F. J., Vázquez, M. D., Debán, L. and Aller, A. J. (2016) "Inorganic arsenic speciation by differential pulse anodic stripping voltammetry using thoria nanoparticles-carbon paste electrodes", *Talanta*. Elsevier, 152, pp. 211–218.
- PubChem (2018) *Lead*. Available at: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5352425> (Accessed: May 12, 2023).
- Róžański, S., Jaworska, H., Matuszczak, K., Nowak, J. and Hardy, A. (2017) "Impact of highway traffic and the acoustic screen on the content and spatial distribution of heavy metals in soils", *Environmental Science and Pollution Research*. Springer Verlag, 24(14), pp. 12778–12786.

- Sardans, J., Montes, F. and Peñuelas, J. (2010) "Determination of As, Cd, Cu, Hg and Pb in biological samples by modern electrothermal atomic absorption spectrometry", *Spectrochimica Acta - Part B Atomic Spectroscopy*. Elsevier B.V., 65(2), pp. 97–112.
- Sereshti, H., Entezari Heravi, Y. and Samadi, S. (2012) "Optimized ultrasound-assisted emulsification microextraction for simultaneous trace multielement determination of heavy metals in real water samples by ICP-OES", *Talanta*. Elsevier, 97, pp. 235–241.
- Singh, A. K. and Singh, M. (2006) "Lead decline in the Indian environment resulting from the petrol-lead phase-out programme", *Science of the Total Environment*, 368(2–3), pp. 686–694.
- Tahoon M, Siddeeg S, Alsaiani N, B. R. F. (2020) "Effective heavy metals removal from water using nanomaterials: A review", *Processes*, 8(6), pp. 1–24.
- Tokalioglu, Ş. (2012) "Determination of trace elements in commonly consumed medicinal herbs by ICP-MS and multivariate analysis", *Food Chemistry*, 134(4), pp. 2504–2508.
- Tooms, S., Stokes, A. and Turner, A. (2023) "Lead in painted surfaces and dusts from rented urban properties (Plymouth, UK)", *Environmental Pollution*. Elsevier Ltd, 316(P1), p. 120503.
- Triantafyllidou, S. y Edwards, M. (2012) "Lead (Pb) in Tap Water and in Blood: Implications for Lead Exposure in the United States", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42, pp. 1297–1352.
- Trzcinka-Ochocka, M., Brodzka, R. and Janasik, B. (2016) "Useful and Fast Method for Blood Lead and Cadmium Determination Using ICP-MS and GF-AAS; Validation Parameters", *Journal of Clinical Laboratory Analysis*, 30(2), pp. 130–139.
- Velarde, L., Nabavi, M. S., Escalera, E., Antti, M. L. and Akhtar, F. (2023) "Adsorption of heavy metals on natural zeolites: A review", *Chemosphere*. Elsevier Ltd, 328(February), p. 138508.
- Wensman, S. M., Shiel, A. E. and McConnell, J. R. (2022) "Lead isotopic fingerprinting of 250-years of industrial era pollution in Greenland ice", *Anthropocene*. Elsevier Ltd, 38, p. 100340.
- Zeng, G., Wan, J., Huang, D., Hu, L., Huang, C., Cheng, M., Xue, W., Gong, X., Wang, R. and Jiang, D. (2017) "Precipitation, adsorption and rhizosphere effect: The mechanisms for Phosphate-induced Pb immobilization in soils—A review", *Journal of Hazardous Materials*. Elsevier B.V., 339, pp. 354–367. doi:10.1016/j.jhazmat.2017.05.038.

- Zhang, J., Yang, R., Li, Y. C., Peng, Y., Wen, X. and Ni, X. (2020) "Distribution, accumulation, and potential risks of heavy metals in soil and tea leaves from geologically different plantations", *Ecotoxicology and Environmental Safety*. Academic Press, 195.
- Zheng, K., Zeng, Z., Tian, Q., Huang, J., Zhong, Q. and Huo, X. (2023) "Epidemiological evidence for the effect of environmental heavy metal exposure on the immune system in children", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 868(January), p. 161691.
- Zhuang, P., McBride, M. B., Xia, H., Li, N. and Li, Z. (2009) "Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China", *Science of the Total Environment*. Elsevier B.V., 407(5), pp. 1551–1561.

7 ANEXOS

Tabla S2. Equilibrios químicos y electroquímicos básicos en el sistema Pb - H₂O a 25°C y 1 bar. Fuente: (Nikolaychuk, 2018).

No. of line in Fig. 2 and 3	Electrode reaction	E, V (SHE) or pH of the solution
a	$2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2(\text{g}); P_{\text{H}_2(\text{g})} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ bar}$	$E = 0.186 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
b	$\text{O}_2(\text{g}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}); P_{\text{O}_2(\text{g})} = 0.21 \text{ bar}$	$E = 1.219 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
1	$\begin{cases} \text{PbOH}^+(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ \text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 4\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \end{cases}$	$\text{pH} = 6.181 + \log \frac{a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})}}{a_{\text{Pb}^{2+}(\text{aq})}} = 4.819 + 0.25 \cdot \log \frac{a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}}{a_{\text{Pb}^{2+}(\text{aq})}^4}$
2	$\begin{cases} \text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 3\text{PbOH}^+(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ \text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 6\text{PbOH}^+(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ 4\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 3\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ 2\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons 3\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \end{cases}$	$\text{pH} = 4.809 + \log \frac{a_{\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq})}}{a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})}^3} = 2.792 + 0.5 \cdot \log \frac{a_{\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq})}}{a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})}^6} =$ $= 8.897 + 0.25 \cdot \log \frac{a_{\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq})}^4}{a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}^3} = 6.880 + 0.25 \cdot \log \frac{a_{\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq})}^2}{a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}^3}$
3	$\begin{cases} 3\text{PbO}(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq}); \\ 6\text{PbO}(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq}) \end{cases}$	$\text{pH} = 7.417 - 0.5 \cdot \log a_{\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq})} = 8.425 - 0.25 \cdot \log a_{\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq})}$
4	$\begin{cases} \text{PbO}(\text{s}) + \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{PbOH}^+(\text{aq}); \\ 4\text{PbO}(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) \end{cases}$	$\text{pH} = 6.547 - \log a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})} = 7.910 - 0.25 \cdot \log a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}$
5	$\begin{cases} \text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{PbOH}^+(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ 4\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 8\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \end{cases}$	$\text{pH} = 10.951 + 0.5 \cdot \log \frac{a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}}{a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})}} = 11.633 + 0.125 \cdot \log \frac{a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}^4}{a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}}$
6	$\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{PbO}(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	$\text{pH} = 15.355 + \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}$
7	$\begin{cases} 3\text{Pb}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ 6\text{Pb}(\text{OH})_2(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \end{cases}$	$\text{pH} = 8.673 - 0.5 \cdot \log a_{\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq})} = 9.682 - 0.25 \cdot \log a_{\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq})}$
8	$\begin{cases} \text{Pb}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{PbOH}^+(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ 4\text{Pb}(\text{OH})_2(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \end{cases}$	$\text{pH} = 7.385 - \log a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})} = 8.748 - 0.25 \cdot \log a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}$
9	$\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq}) \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{OH})_2(\text{s}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	$\text{pH} = 14.518 + \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}$
10	$\text{Pb}(\text{fcc}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \rightleftharpoons \text{PbH}_4(\text{g}); P_{\text{PbH}_4(\text{g})} = 1 \text{ bar}$	$E = -0.700 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
11	$\text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{fcc})$	$E = -0.127 + 0.0295 \cdot \log a_{\text{Pb}^{2+}(\text{aq})}$
12	$\begin{cases} \text{PbOH}^+(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{fcc}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ \text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 8\text{e}^- \rightleftharpoons 4\text{Pb}(\text{fcc}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \end{cases}$	$E = 0.056 - 0.0295 \cdot \text{pH} + 0.0295 \cdot \log a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})} =$ $= 0.016 - 0.0295 \cdot \text{pH} + 0.0074 \cdot \log a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}$
13	$\begin{cases} \text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 6\text{e}^- \rightleftharpoons 3\text{Pb}(\text{fcc}) + 4\text{H}_2\text{O}(\text{l}); \\ \text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 12\text{e}^- \rightleftharpoons 6\text{Pb}(\text{fcc}) + 8\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \end{cases}$	$E = 0.104 - 0.0394 \cdot \text{pH} + 0.00985 \cdot \log a_{\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq})} =$ $= 0.084 - 0.0394 \cdot \text{pH} + 0.00493 \cdot \log a_{\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq})}$
14	$\text{PbO}(\text{s}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{fcc}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l})$	$E = 0.250 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
15	$\text{Pb}(\text{OH})_2(\text{s}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{fcc}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	$E = 0.275 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
16	$\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + 3\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Pb}(\text{fcc}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{l})$	$E = 0.704 - 0.0887 \cdot \text{pH} + 0.0295 \cdot \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}$

17	$\begin{cases} \text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + 5\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{PbOH}^+(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}); \\ 4\text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + 20\text{H}^+(\text{aq}) + 8\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O} (\text{l}) \end{cases}$	$E = 1.558 - 0.1478 \cdot \text{pH} - 0.0887 \cdot \log a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})} =$ $= 1.679 - 0.1478 \cdot \text{pH} - 0.0111 \cdot \log a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}$
18	$\begin{cases} \text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq}); \\ 2\text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + 8\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq}) \end{cases}$	$E = 1.416 - 0.1182 \cdot \text{pH} - 0.0295 \cdot \log a_{\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq})} =$ $= 1.476 - 0.1182 \cdot \text{pH} - 0.0143 \cdot \log a_{\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq})}$
19	$\text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{PbO} (\text{s}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$E = 0.978 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
20	$\text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{Pb}(\text{OH})_2 (\text{s})$	$E = 0.903 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
21	$\text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + 5\text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + \text{H}^+(\text{aq})$	$E = -0.385 + 0.0295 \cdot \text{pH} - 0.0887 \cdot \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}$
22	$\begin{cases} \text{Pb}_{12}\text{O}_{17} (\text{s}) + 22\text{H}^+(\text{aq}) + 10\text{e}^- \leftrightarrow 12\text{PbOH}^+(\text{aq}) + 5\text{H}_2\text{O} (\text{l}); \\ \text{Pb}_{12}\text{O}_{17} (\text{s}) + 22\text{H}^+(\text{aq}) + 10\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 5\text{H}_2\text{O} (\text{l}) \end{cases}$	$E = 1.443 - 0.1300 \cdot \text{pH} - 0.0709 \cdot \log a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})} =$ $= 1.540 - 0.1300 \cdot \text{pH} - 0.0177 \cdot \log a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}$
23	$\begin{cases} \text{Pb}_{12}\text{O}_{17} (\text{s}) + 18\text{H}^+(\text{aq}) + 10\text{e}^- \leftrightarrow 4\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}); \\ \text{Pb}_{12}\text{O}_{17} (\text{s}) + 18\text{H}^+(\text{aq}) + 10\text{e}^- \leftrightarrow 2\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) \end{cases}$	$E = 1.330 - 0.1064 \cdot \text{pH} - 0.0236 \cdot \log a_{\text{Pb}_3(\text{OH})_4^{2+}(\text{aq})} =$ $= 1.377 - 0.1064 \cdot \text{pH} - 0.0118 \cdot \log a_{\text{Pb}_6(\text{OH})_8^{4+}(\text{aq})}$
24	$\text{Pb}_{12}\text{O}_{17} (\text{s}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow 4\text{Pb}_3\text{O}_4 (\text{s}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$E = 0.983 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
25	$\text{Pb}_{12}\text{O}_{17} (\text{s}) + 19\text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 10\text{e}^- \leftrightarrow 12\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq})$	$E = -0.111 + 0.0118 \cdot \text{pH} - 0.0709 \cdot \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}$
26	$\begin{cases} \text{Pb}_{12}\text{O}_{19} (\text{s}) + 26\text{H}^+(\text{aq}) + 14\text{e}^- \leftrightarrow 12\text{PbOH}^+(\text{aq}) + 7\text{H}_2\text{O} (\text{l}); \\ \text{Pb}_{12}\text{O}_{19} (\text{s}) + 26\text{H}^+(\text{aq}) + 14\text{e}^- \leftrightarrow 3\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 7\text{H}_2\text{O} (\text{l}) \end{cases}$	$E = 1.348 - 0.1098 \cdot \text{pH} - 0.0507 \cdot \log a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})} =$ $= 1.418 - 0.1098 \cdot \text{pH} - 0.0129 \cdot \log a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}$
27	$\text{Pb}_{12}\text{O}_{19} (\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 4\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}_{12}\text{O}_{17} (\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$E = 1.111 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
28	$\text{Pb}_{12}\text{O}_{19} (\text{s}) + 17\text{H}_2\text{O} (\text{l}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) + 14\text{e}^- \leftrightarrow 12\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})$	$E = 0.238 - 0.0084 \cdot \text{pH} - 0.0507 \cdot \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}$
29	$\text{PbO}_2 (\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$E = 1.449 - 0.1182 \cdot \text{pH} - 0.0295 \cdot \log a_{\text{Pb}^{2+}(\text{aq})}$
30	$\begin{cases} \text{PbO}_2 (\text{s}) + 3\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{PbOH}^+(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}); \\ 4\text{PbO}_2 (\text{s}) + 12\text{H}^+(\text{aq}) + 8\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq}) + 4\text{H}_2\text{O} (\text{l}) \end{cases}$	$E = 1.267 - 0.0887 \cdot \text{pH} - 0.0295 \cdot \log a_{\text{PbOH}^+(\text{aq})} =$ $= 1.307 - 0.0887 \cdot \text{pH} - 0.0074 \cdot \log a_{\text{Pb}_4(\text{OH})_4^{4+}(\text{aq})}$
31	$\text{PbO}_2 (\text{s}) + 10\text{H}^+(\text{aq}) + 10\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}_{12}\text{O}_{19} (\text{s}) + 5\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$E = 1.152 - 0.0591 \cdot \text{pH}$
32	$\text{PbO}_2 (\text{s}) + \text{H}_2\text{O} (\text{l}) + \text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})$	$E = 0.619 - 0.0295 \cdot \text{pH} - 0.0295 \cdot \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}$
33	$\text{Pb}(\text{OH})_6^{2-}(\text{aq}) + 2\text{H}^+(\text{aq}) \leftrightarrow \text{PbO}_2 (\text{s}) + 4\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$\text{pH} = 15.609 + 0.5 \cdot \log a_{\text{Pb}(\text{OH})_6^{2-}(\text{aq})}$
34	$\text{Pb}(\text{OH})_6^{2-}(\text{aq}) + 3\text{H}^+(\text{aq}) + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq}) + 3\text{H}_2\text{O} (\text{l})$	$E = 1.365 - 0.0887 \cdot \text{pH} + 0.0295 \cdot \log \frac{a_{\text{Pb}(\text{OH})_6^{2-}(\text{aq})}}{a_{\text{Pb}(\text{OH})_3^-(\text{aq})}}$

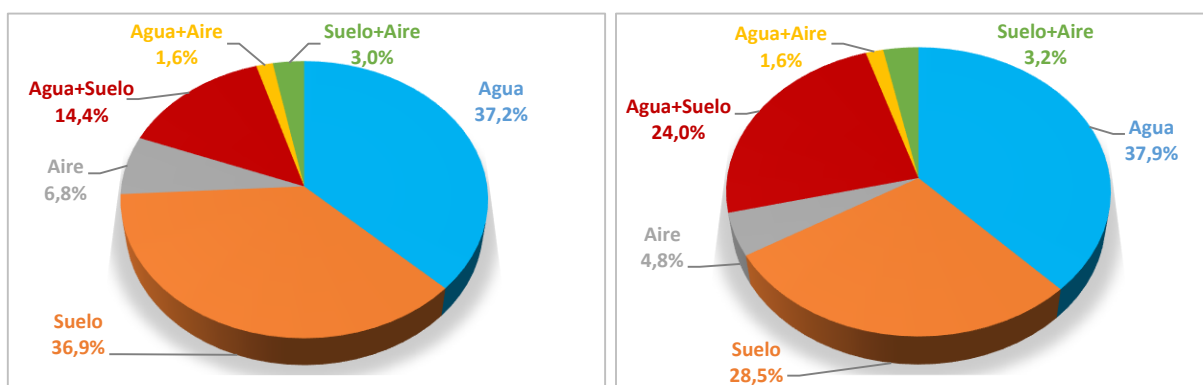


Figura S1. Comparación entre el número de artículos publicados por (A) Scopus y (B) WOS referidos a los distintos compartimentos ambientales en los que está presente el plomo, retirando el compartimento ambiental agua + suelo + aire. Fuente: elaboración propia.

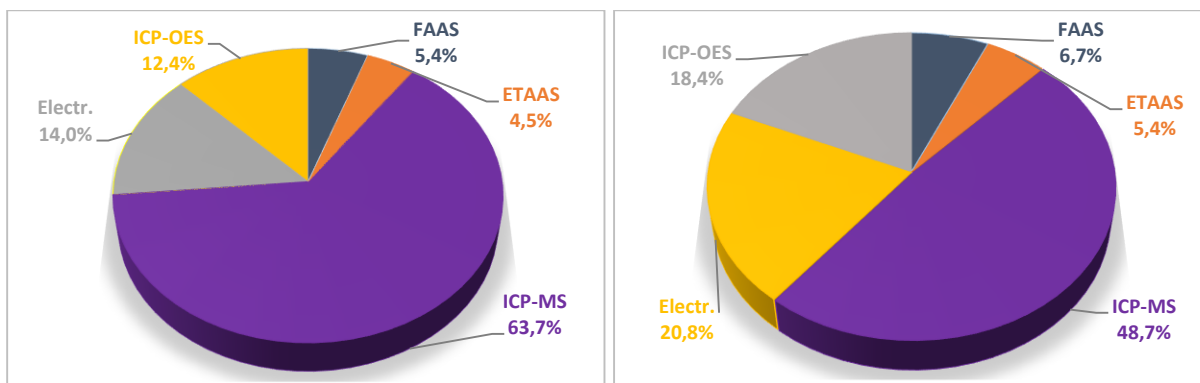


Figura S2. Comparación entre el número de artículos publicados por (A) Scopus y (B) WOS, referidos a los distintos métodos de análisis y determinación de plomo, retirando las técnicas de caracterización. Fuente: elaboración propia.