

Determinación de polonio – 210 (^{210}Po) en alimentos y agua: una revisión (2014-2019)

Determination of polonium - 210 (^{210}Po) in food and water: a review (2014-2019)

Nataly Rocío Barbosa González¹, Jaidith Marisol Ramos Rincón¹

Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, 5, 26-43, 2021
Recibido: 13 de julio de 2021
Aceptado: 27 de agosto de 2021
Publicado en línea: 28 de octubre de 2021
Doi: <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.5.2021.592>



Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento 4.0.

Citación: N. R. Barbosa González y J. M. Ramos Rincón, “Determinación de polonio-210 (^{210}Po) en alimentos y agua: una revisión (2014-2019)”, *Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares*, n.º 5, pp. 26-43, 2021. <https://doi.org/10.32685/2590-7468/invapnuclear.5.2021.592>

Resumen

El polonio-210 (^{210}Po) es uno de los radionúclidos que genera mayor preocupación debido a su radiotoxicidad. La mayoría del ^{210}Po que se encuentra en nuestro entorno se produce de forma natural y su distribución ambiental es el resultado de dos procesos principales: 1) la liberación de radón-222 (^{222}Rn) de la corteza terrestre y 2) la disolución del radio-226 (^{226}Ra) en fuentes hídricas, ambas, matrices ambientales dinámicas que contribuyen a la dispersión de radioisótopos y de procesos antropogénicos como el de las industrias de fosfato, la minería de uranio y la explotación de carbón, responsables de la liberación de ^{210}Po en acuíferos. Es importante reconocer que por medio de las redes tróficas se puede generar distribución de este radioisótopo, pues está presente en varios alimentos y en el agua. Para ampliar esta información, se realizó una revisión bibliográfica, siguiendo la metodología PRISMA, y se encontró que existen varios estudios, en especial en países europeos. En América se observa que los únicos países que han adelantado investigaciones al respecto son Brasil, Canadá y Estados Unidos. En Colombia, el Instituto de Asuntos Nucleares, el Servicio Geológico Colombiano y la Universidad Nacional sede Medellín han desarrollado estudios, pero no hay publicaciones sobre este tema en las bases de datos para el periodo 2014-2019. Durante la revisión, se encontraron diferentes metodologías para la preparación de muestras y análisis de ^{210}Po en alimentos y agua, por tanto, se elaboró una metodología que reuniera los métodos más económicos y fiables para futuras investigaciones de tipo experimental. Se concluye que es importante monitorear los alimentos para la determinación y cuantificación de elementos radiactivos, pues, de acuerdo con los datos experimentales reportados en los artículos revisados, la dosis efectiva por ^{210}Po aportada por alimentos puede llegar a causar daños en la salud, sobre todo la proveniente de alimentos de mar.

Palabras clave: polonio-210, alimentos, agua, elementos radiactivos.

¹ Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
Autora de correspondencia: Jaidith Marisol Ramos, jmramosr@udistrital.edu.co

Abstract

Polonium-210 (²¹⁰Po) is one of the most concerning radionuclides due to its radiotoxicity. Most of the ²¹⁰Po found in our environment is naturally occurring and distributed by two main processes: 1) the release of radon-222 (²²²Rn) from the Earth's crust and 2) the dissolution of radium-226 (²²⁶Ra) in water sources, where both these dynamic environmental matrices contribute to the dispersion of radioisotopes, and anthropogenic processes, such as phosphate industries, uranium mining and coal exploitation, release ²¹⁰Po into aquifers. It is important to recognize that ²¹⁰Po in various foods and waters can be distributed through trophic networks. To collect further information on ²¹⁰Po detection, a bibliographic review was carried out following the PRISMA methodology, revealing that several studies have been performed, especially in European countries. Brazil, Canada and the United States are the only countries in the Americas that have performed studies. In Colombia, the Instituto de Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano and Universidad Nacional de Colombia, Medellín campus, have carried out studies, but no corresponding publications were found in databases for 2014-2019. The review uncovered the use of different methodologies for the preparation of samples and analysis of ²¹⁰Po in food and water, and a methodology was developed to bring together the most economical and reliable methods for future experimental research. It is concluded that it is important to monitor food for the detection and quantification of radioactive elements because the experimental data reported in the reviewed articles show that the effective dose of ²¹⁰Po in food, especially seafood, can damage health.

Keywords: polonium-210, food, water, radioactive elements.

1. Introducción

El polonio es el elemento número 84 de la tabla periódica y cuenta con 25 isótopos, todos radiactivos. El isótopo 210 es un metal radiactivo descubierto por Marie Curie y Pierre Curie en 1898, procedente de la serie de decaimiento del ²³⁸U. Se encuentra habitualmente en matrices ambientales como el suelo, y especialmente en rocas ígneas como el granito y la pegmatita, y en sedimentos como conglomerados, arcillas y areniscas, pues, al ser porosos, acumulan minerales de uranio y torio [1], [2], [3] y, por ende, también están presentes radionúclidos como el ²¹⁰Po que pertenece a esta serie de decaimiento.

Otra matriz ambiental en la que está presente este radionúclido es la atmosférica, debido a emisiones naturales o artificiales por la producción de gases contaminantes generados por industrias de tabaco, fertilizantes fosfatados, plantas nucleares y la industria de extracción carbonífera, se encuentra también en fuentes hídricas como océanos, lagos y ríos [4], [5]. Se ha evidenciado que la mayoría de las fuentes hídricas utilizadas para la recolección de agua están contaminadas por

radioisótopos producto de los residuos de la industria de fertilizantes de fosfatos, de la meteorización de rocas graníticas y de desechos de reactores nucleares [2], [6].

De acuerdo con esto, el ²¹⁰Po puede ingresar al cuerpo humano por diferentes vías: oral, intravenosa, por inhalación o a través de heridas [7], [8], [9]. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el ser humano está expuesto en su vida cotidiana a radiaciones ionizantes naturales y artificiales; un 8 % de esta radiación es aportada por el consumo de alimentos y agua con presencia de radionúclidos, y se estima que el ²¹⁰Po es uno de los mayores contribuyentes a la dosis recibida por el hombre [10].

En cuanto a la ingesta de ²¹⁰Po a través de alimentos, se puede decir que su absorción se produce junto con los nutrientes a través del intestino delgado, que luego es transferido a la sangre y, por consiguiente, es transportado hacia otros tejidos corporales. En varios estudios se indica que el ²¹⁰Po logra ser expulsado por el organismo a través de las heces y la orina, pero otros afirman que puede ser retenido en algunos tejidos, generando cambios genéticos o somáticos, como leucemia, tumores malignos y benignos, por lo que es reco-

nocido por su alta radiotoxicidad [9]. El isótopo radiactivo 210 del polonio es emisor alfa con un tiempo de vida media de 138,4 días, decayendo a ²⁰⁶Pb, isótopo estable [11].

En estudios realizados en Bélgica, Brasil, Irán y Rusia en 2017, se demostró que estos radioisótopos afectan la salud humana y animal, y el equilibrio de las plantas [11], [12]. En Canadá, Estados Unidos y Brasil se han realizado investigaciones experimentales en las que se busca analizar la distribución y el comportamiento del ²¹⁰Po en diversas matrices ambientales como fuentes hídricas, suelos y alimentos, pues se considera de gran importancia científica, ecológica y de salud pública, debido a su amplia dispersión e intensa acumulación biológica y selectiva, además de que es un marcador biológico y geoquímico indirecto de ²¹⁰Pb [13]. Muchos estudios se han centrado en los alimentos de origen marino, debido a que los peces cumplen un papel importante en la transferencia de radionúclidos a los seres humanos, trabajos que han contribuido con datos sobre el tropismo de este radionúclido en el organismo de seres vivos [7], [9].

En Colombia, al ser un país con gran biodiversidad, se han realizado varias exploraciones para la explotación de minerales radiactivos en departamentos como Santander, Boyacá, Caldas, Cundinamarca, Huila y Guainía. Según el Servicio Geológico Colombiano hay tres proyectos activos para la explotación de ²³⁸U y se han identificado casos de explotación minera informal e ilegal de elementos radiactivos [14], [15], [16]. De allí la importancia de generar trabajos de análisis de la vegetación

y fauna que están cerca a dichas explotaciones, pues, como se mencionó, el ²¹⁰Po tiene una vida media de 138,4 días, periodo en el que se puede depositar en vegetales, fuentes hídricas, lixiviados del suelo e incluso en animales, a partir de los cuales pueden llegar al ser humano por medio de las redes tróficas.

Hay varios trabajos dedicados a la determinación de los niveles de ²¹⁰Po en matrices como agua de bebida, verduras, carnes, pescados, dieta, orientados a determinar las dosis que reciben las diferentes poblaciones del mundo, asociadas a la incorporación por ingestión de este radionúclido. Por tanto, es importante realizar una revisión sobre el estado del arte en el conocimiento de la presencia de ²¹⁰Po en alimentos y agua, para analizar la viabilidad de adelantar estudios similares de carácter nacional [7], [17]. En este sentido, se revisaron diferentes estudios sobre la presencia de ²¹⁰Po en alimentos y agua, a través del método PRISMA, en diferentes bases de datos y teniendo como referencia artículos publicados entre 2014 y 2019. Asimismo, se identificaron las diferentes metodologías de cuantificación de este radionúclido para visualizar la factibilidad e importancia de realizar este tipo de estudios en Colombia [7].

2. Metodología

Se diseñó una investigación de tipo exploratorio, descriptivo y correlacional teórica, bajo la metodología PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analy-*

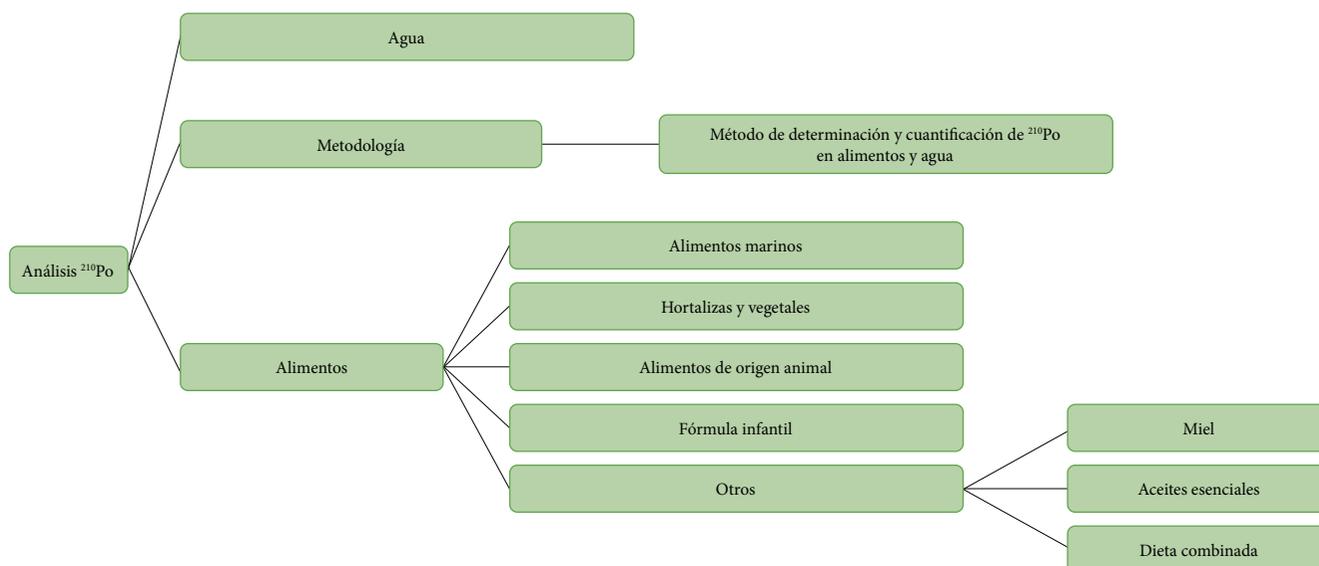


Figura 1. Estructura organizacional para el análisis de los artículos seleccionados

ses) [18]. Esta investigación se fundamentó en el interés por conocer la presencia de ²¹⁰Po en los alimentos y agua, así como en métodos de identificación del radionúclido y su forma de contaminación de alimentos y agua. Se utilizaron palabras clave como: “polonium 210”, “pollution” y “food” para realizar una búsqueda en las bases de datos ScienceDirect, PubMed, SpringerLink y Redalyc. Se tuvieron en cuenta los artículos de investigación y de revisión publicados entre enero de 2014 y marzo de 2019, que cumplieron con los criterios año de divulgación, especificidad en el alimento contaminado y contaminante ²¹⁰Po.

Para el análisis de los artículos se creó una estructura organizacional en la que se agrupan los alimentos conforme a algunas características compartidas, como se muestra en la figura 1. Cabe resaltar que el ítem “dieta combinada” hace referencia a los artículos en los que no se especifica qué alimento se estudió, pues se evaluaron alimentos elaborados como desayuno, almuerzo y cena, y se analizaron todos los alimentos a la vez, dado que es importante medir la cantidad de radioisótopos de una dieta general para conocer la dosis efectiva aportada por el consumo de alimentos en un día normal.

Se revisaron los artículos por años, continentes, países, alimentos y revistas, con el fin de extraer y discriminar los datos necesarios para los objetivos específicos de la investigación. Se buscó información sobre las características químicas, los alimentos contaminados, el lugar de contaminación, las formas de contaminación, las causas de la contaminación, el mecanismo de acción y la vida media del radionúclido.

3. Resultados y discusión

Para la revisión teórica bajo la metodología PRISMA, y para conocer la presencia de ²¹⁰Po en los alimentos y agua, así como los métodos de determinación y cuantificación del radionúclido y la forma de contaminación, se compararon los resultados obtenidos por cada base de datos y se discriminaron los artículos repetidos, ejercicio que arrojó un total de 75 artículos, de los cuales 73 eran artículos de investigación y solo 2 de revisión bibliográfica.

3.1. Análisis inicial de la información

Inicialmente se realizó la clasificación de los artículos por año, continente, país, alimento y revista, con el fin de extraer

y discriminar la información, y realizar un análisis profundo que diera cuenta de las características químicas, alimentos contaminados, lugar de contaminación, formas de contaminación, causas de la contaminación, mecanismo de acción y vida media del radionúclido.

3.1.1. Análisis de la información inicial por bases de datos

Durante la revisión se encontró que la base de datos que aloja más artículos sobre el tema es ScienceDirect (33 artículos), entre estos los dos de revisión. Posteriormente, las bases de datos PubMed y SpringerLink registraron 18 artículos, cada una; PubMed, orientada a la publicación de investigación biomédica, enfatiza en los efectos generados por la ingestión de radionúclidos a través de alimentos; SpringerLink publica investigaciones en diferentes áreas, por lo que, quizás, se encuentra una menor cantidad de material. Por último, en Redalyc se ubicaron 6 artículos, para un total de 75 (figura 2).

3.1.2. Análisis inicial por revista

La revista que más artículos ha publicado sobre la presencia y determinación de ²¹⁰Po es el *Journal of Environmental Radioactivity* con 24 artículos (figura 3); su contenido aborda información científica sobre la radiactividad y los diferentes sistemas naturales a nivel internacional. La segunda revista con más publicaciones fue el *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, con 8 artículos; divulga escritos originales, cartas, artículos de revisión y comunicaciones breves sobre química nuclear y sus efectos en el ambiente y la salud

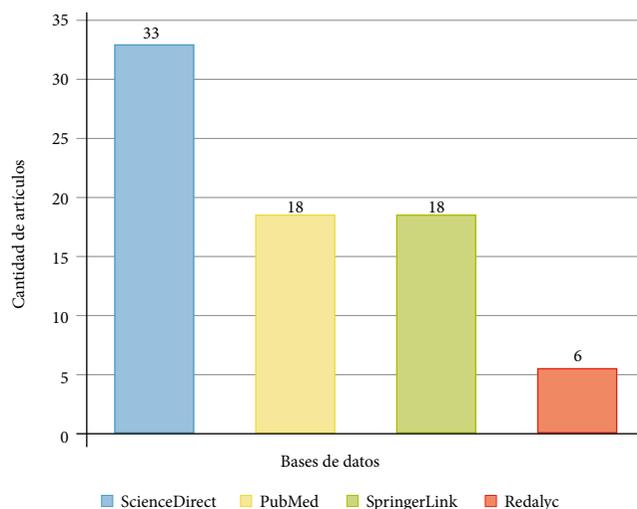


Figura 2. Número de artículos encontrados por base de datos

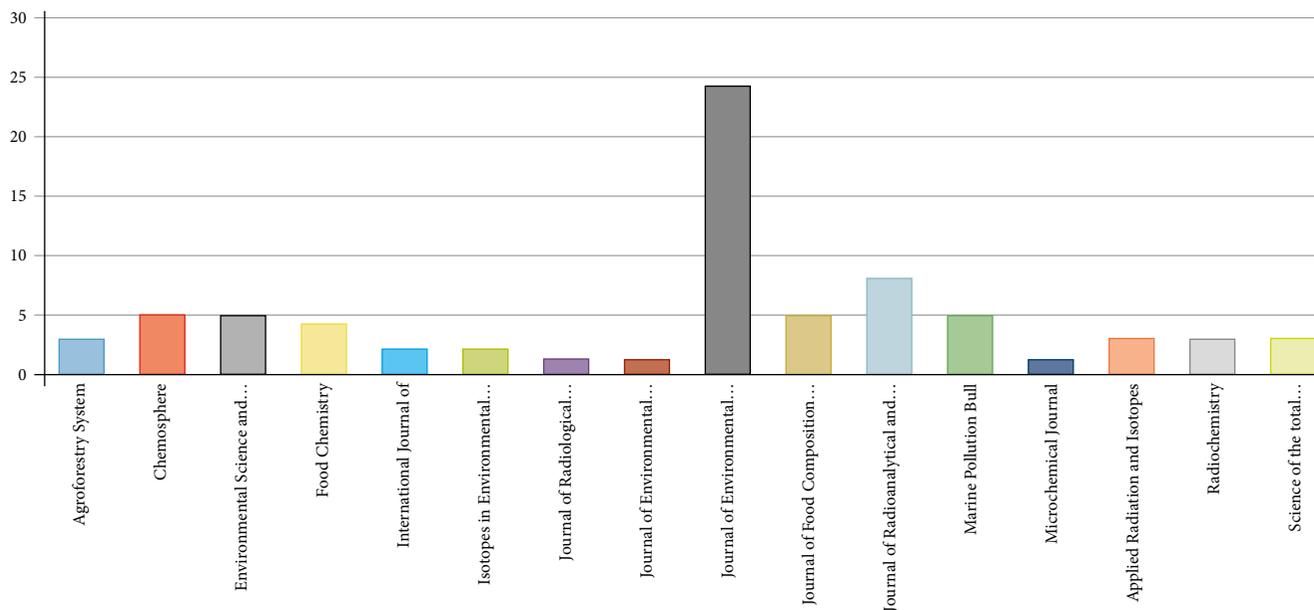


Figura 3. Número de artículos publicados por revista

humana. Las revistas *Chemosphere*, *Environmental Science and Pollution Research* y *Marine Pollution Bull* (5 artículos, cada una) se basan en la investigación de contaminación de matrices ambientales desde diferentes enfoques, y no necesariamente desde los elementos radiactivos. Los demás artículos están distribuidos de manera homogénea entre las revistas restantes.

3.1.3. Análisis de la información inicial por año de publicación

Con respecto a los años de mayor publicación de artículos sobre el tema, se encontró que en el 2018 se publicaron 16, pero en los años 2014, 2015, 2016 y 2017 no hubo una diferencia notable (figura 4), lo cual se debe a que muchas de las investigaciones al respecto tuvieron un auge después del accidente nuclear de Fukushima en 2011, año a partir del cual se evidenciaron cambios en los ecosistemas de la geografía cercana al sitio de accidente.

Por esta razón, en 2016 Japón presentó un informe sobre las condiciones en la central nuclear de Fukushima Daiichi de TEPCO al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), que ha realizado un seguimiento del nivel de radionúclidos en agua, sedimentos, fauna y flora para verificar que las matrices ambientales no estén contaminadas por isótopos liberados al ambiente después de ese desastre [19]. En 2015 se publicaron 14 artículos relacionados con el tema; seguido

por 2014, con 13; luego 12 artículos en 2016, 12 en 2017, y 8 en los tres primeros meses de 2019, que sugiere que en 2019 habría un incremento de las publicaciones sobre el tema. En general, se evidenció que el número de artículos se mantuvo en un promedio de 12 por año.

3.1.4. Análisis de la información inicial por artículos publicados por continente

De acuerdo con la figura 5, el continente que más investigaciones ha realizado sobre el tema es Europa, con 36 artículos; esto se puede deber a que en esta región se encuentra la

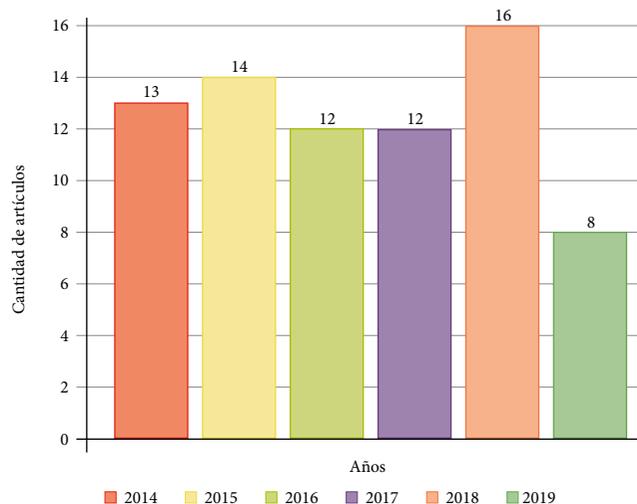


Figura 4. Número de artículos publicados por año

mayor cantidad de centrales nucleares del mundo (figura 6). El segundo continente con más publicaciones es Asia, con 27 artículos, pues, al igual que Europa, tiene un número importante de centrales nucleares, pero, además, porque de

acuerdo con los estudios realizados en este espacio geográfico, hay gran cantidad de rocas ígneas ricas en elementos radiactivos, que han generado contaminación por radioisótopos en varias matrices ambientales. Asia es seguido por América con 9 artículos. Por otro lado, está Oceanía con 3 artículos, pues no hay centrales nucleares en este continente (ver figura 6). Sin embargo, han visto la necesidad de realizar estudios por los accidentes nucleares en Asia, que han generado cambios en algunas de sus zonas geográficas. Por último, África no ha publicado artículos al respecto, aunque muchos de los estudios realizados por investigadores de otros continentes se han llevado a cabo allí. En cuanto a la Antártida, no se encontró información sobre investigaciones de este tipo.

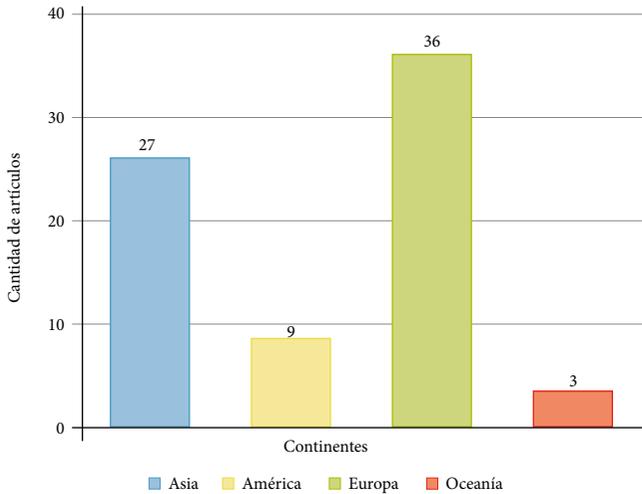


Figura 5. Número de artículos publicados por continente

3.1.5. Análisis de la información inicial por país de publicación

Los países que más han publicado artículos de investigación sobre la presencia de ²¹⁰Po en alimentos son Polonia e India

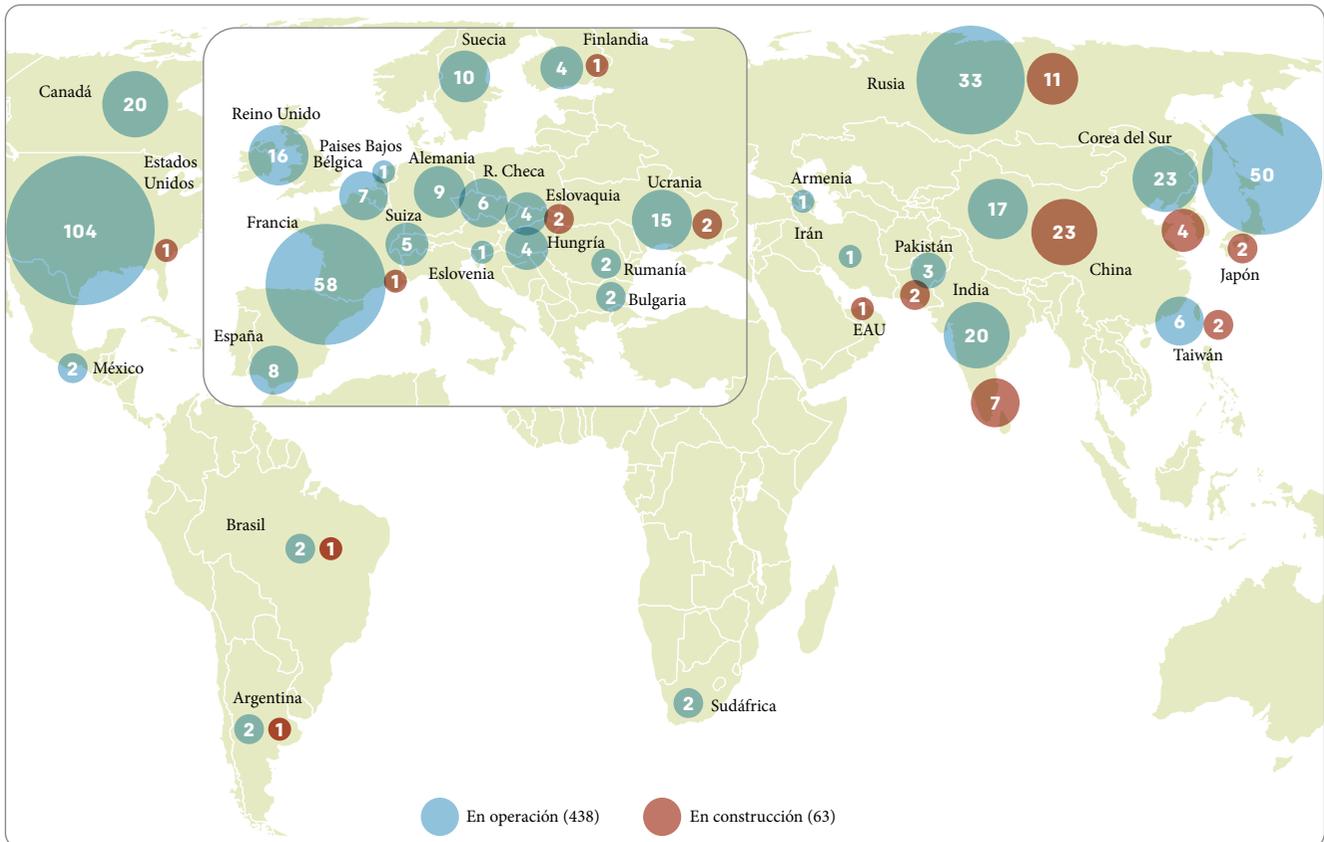


Figura 6. Centrales nucleares en el mundo

Adaptado de: https://elpais.com/elpais/2013/10/21/media/1382381324_769308.html

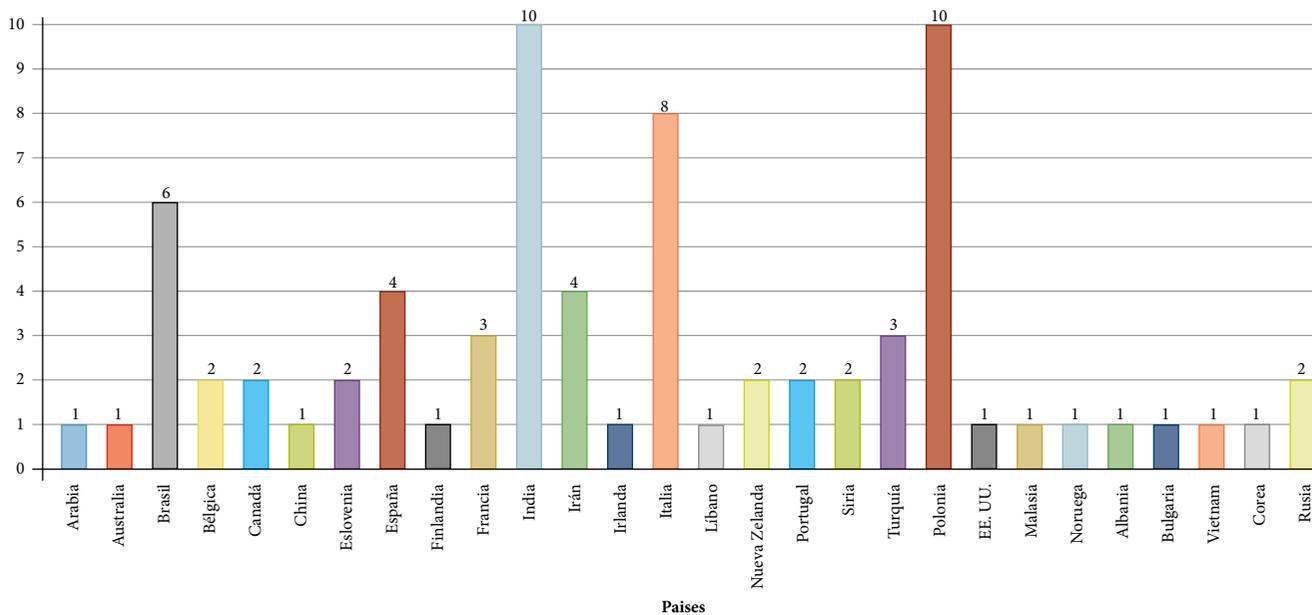


Figura 7. Número de artículos publicados por país

(10 cada uno, figura 7). En el caso de Polonia se han desarrollado todo tipo de investigaciones sobre los efectos de la radiación ionizante y el comportamiento de los diferentes radionúclidos en el ecosistema, pues le apuestan a la energía nuclear, a los avances científicos relacionados y al estudio de las propiedades de los diferentes radioisótopos. Aunque en este país no hay plantas o reactores nucleares, se atribuye la presencia de estos radioisótopos a la lluvia radiactiva global después del uso y prueba de armas nucleares y de accidentes en centrales nucleares. Por otra parte, India cuenta con 7 plantas y reactores nucleares de propiedad de otros países, que generan contaminación por radionúclidos en las diferentes matrices ambientales; a este respecto, se hace énfasis en factores sociopolíticos que afectan sus ecosistemas y zonas geográficas [20]. Les sigue Italia con 8 publicaciones, Brasil con 6, España e Irán con 4, cada uno, Francia y Turquía con 3, Bélgica, Canadá, Eslovenia, Nueva Zelanda, Portugal, Siria y Rusia, cada uno con 2. En todos estos países hay centrales nucleares a que se les atribuye la contaminación de las diferentes matrices ambientales, y a la zona geográfica donde se ubican. Es de resaltar que las matrices ambientales son dinámicas; por tanto, si en cierta región del mundo se presenta contaminación por vertimientos de sustancias nucleares, se ven afectados en diferentes proporciones todos los ecosistemas del planeta [7].

3.1.6. Análisis de la información inicial por alimentos

En la figura 8 se observan los resultados de los artículos encontrados por alimento. Se puede observar que la mayor cantidad de escritos se relacionan con peces, seguido por agua, mejillones y mariscos, de lo cual se infiere que los alimentos del mar o de fuentes hídricas tienden a bioacumular ²¹⁰Po y transferirlo mediante la cadena alimenticia, debido a los factores ambientales y antropogénicos que generan la contaminación de fuentes en las que viven. En vista de que los artículos encontrados por alimentos están muy dispersos, se implementó una metodología diferente para el análisis inicial; principalmente se cuantificaron los artículos publicados por alimento, como se muestra en la figura 8, y posteriormente, con base en la metodología propuesta (figura 1), se agruparon los alimentos de acuerdo con características similares, como origen y composición, y cuyos resultados se ilustran en la figura 9.

Los alimentos con mayor concentración de ²¹⁰Po fueron los de origen marino, de acuerdo con 33 artículos; esto se atribuye a la solubilidad de este radionúclido y a su periodo de vida media, pues se afirma que muchos desechos nucleares son vertidos a fuentes hídricas que llegan al mar, bioacumulándose en algas y peces. El siguiente grupo alimenticio con mayor concentración de ²¹⁰Po son las hortalizas (14 artículos), en las que su contaminación se debe al uso de

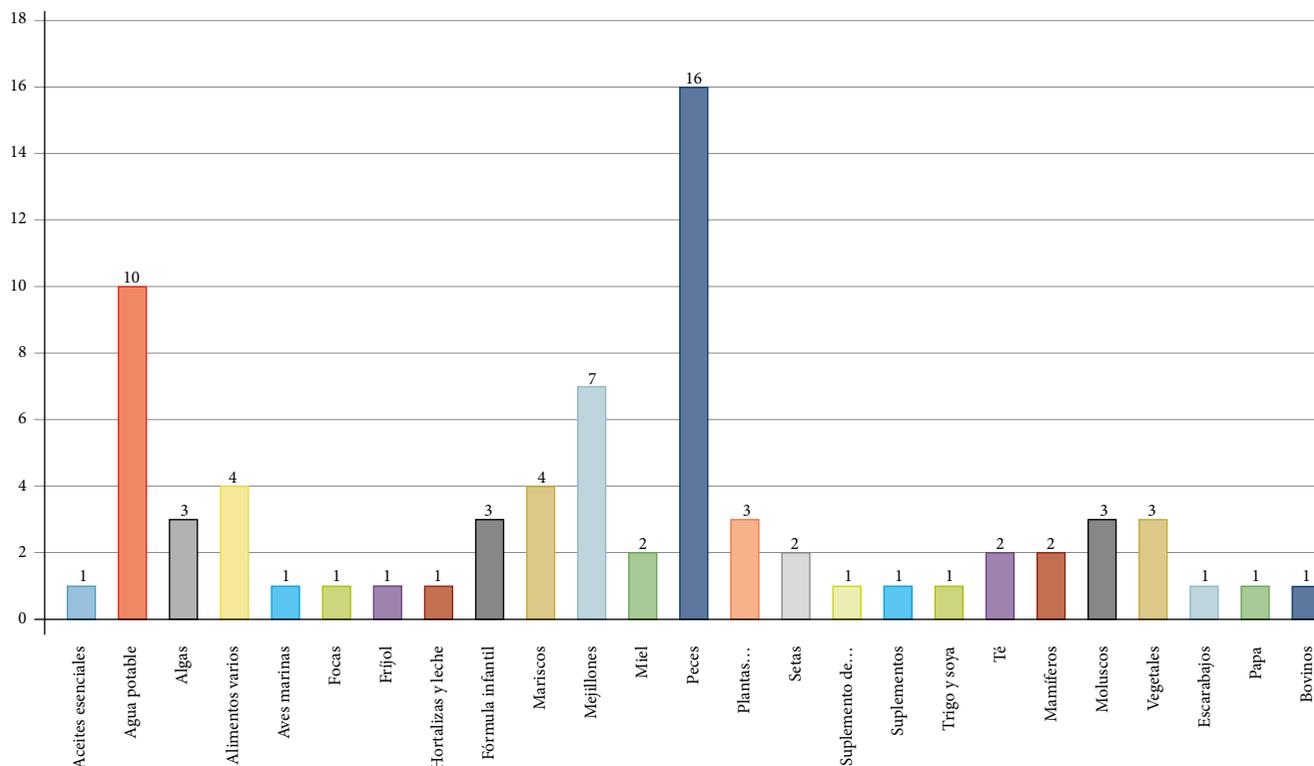


Figura 8. Número de artículos publicados por alimento

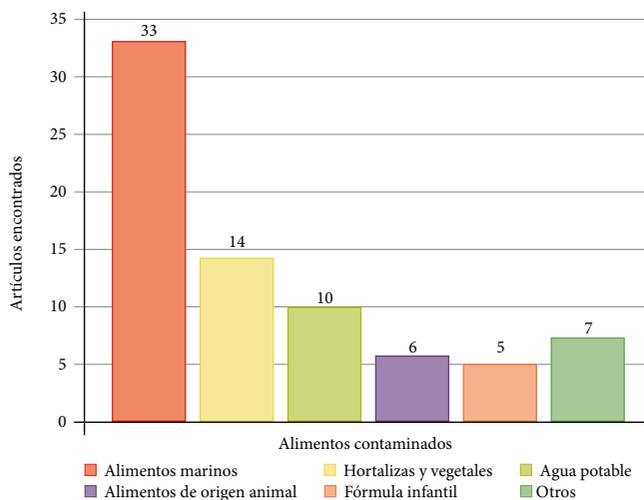


Figura 9. Número de artículos publicados por grupo alimenticio

fertilizantes fosfatados y lixiviados contaminados. Por su lado, en el agua, con 10 artículos, se le atribuye la presencia de este radionúclido a la meteorización natural de la roca de granito junto con actividades mineras, agrícolas e industriales. Luego, se ubican los alimentos de origen animal como mamíferos y aves, con 6 artículos; posteriormente 5 investigaciones sobre fármacos y fórmulas infantiles en los cuales se hace referencia

a la presencia de ²¹⁰Po atribuidas al origen de la materia prima de su síntesis y, por último, 7 artículos distribuidos en alimentos varios como aceites esenciales y miel, cada uno con un artículo publicado, y dieta combinada con 4 artículos. En estas investigaciones no se hace diferencia por grupos alimenticios, sino que realizan el estudio con una mezcla de alimentos propios de la región en la que se desarrolló el estudio.

3.2. Análisis de los artículos seleccionados

Para la segunda parte de los análisis se siguió la organización propuesta en la figura 1. Se estudió la presencia de ²¹⁰Po en cada grupo alimenticio de acuerdo con la información encontrada en los artículos y se describieron brevemente sus metodologías de cuantificación para el análisis del ²¹⁰Po en aguas y alimentos, proponiendo una metodología que reuniera lo encontrado en la revisión.

3.2.1. Presencia de ²¹⁰Po en agua

En la revisión se encontraron 10 artículos específicos sobre la determinación de ²¹⁰Po en agua. De acuerdo con [21], la concentración de ²¹⁰Po varía de 0,7 mBq L⁻¹ ± 0,1 a 5,0 mBq L⁻¹ ± 0,7 y de 0,83 mBq L⁻¹ ± 0,12 a 5,2 mBq L⁻¹ ± 0,8, en muestras

de agua de río y pozos de perforación, respectivamente, por factores naturales y antropogénicos. Como afirman en [8], la principal fuente de ^{210}Po en agua dulce se atribuye a procesos de meteorización natural de las rocas ígneas, especialmente de granito junto con actividades antropogénicas, como la minería, por el uso de metales pesados y la liberación de gases con elementos radiactivos, y la agricultura por lixiviados de cultivos en los que usan fertilizantes fosfatados, desechos líquidos y gaseosos de plantas nucleares. Ya contaminada la fuente principal de agua dulce es poco probable que plantas de tratamiento reduzcan la presencia de radionúclidos, pues el método de coagulación convencional no puede eliminar el ^{210}Po completamente del agua; de allí que sea necesario el desarrollo de tecnologías para su identificación a gran escala, además de métodos que precipiten y separen los radionúclidos presentes en el agua de manera eficiente y económica [22]. El ^{210}Po también se encuentra en agua embotellada; en [23] identificaron este radioisótopo en las paredes de vasos y botellas de polietileno. Tras varios estudios demostraron que el ^{210}Po se adsorbe rápidamente en las paredes de la botella y solo queda el 20 % de ^{210}Po en solución, aproximadamente.

De acuerdo con la dosis anual de radiación recibida por humanos reportadas en [23] y evaluada en 24 muestras de agua potable que contenían ^{210}Po , se evidenció que el rango de las dosis estimadas varió de $0,001\text{mSv año}^{-1}$ a $2,375\text{mSv año}^{-1}$, con una dosis media anual de $0,167\text{mSv año}^{-1}$ [23]. Estas

no superan la dosis efectiva de referencia propuesta por la OMS para ^{210}Po , que es de $0,2$ a $0,8\text{mSv año}^{-1}$ [24], por lo que se infiere que, al estar las dosis dentro del límite máximo para el agua estándar de calidad, no presentan un riesgo para la salud humana. Por otra parte, varios autores [25], [26], [27] afirman que los datos obtenidos pueden proporcionar información básica para los consumidores y autoridades competentes sobre el riesgo de exposición interna, debido a la ingesta de radionúclidos presentes en el agua y, posiblemente, sirva como comparación al evaluar la contribución de la dosis de los radionúclidos artificiales liberados al medio ambiente como resultado de cualquier práctica humana y accidentes en el área estudiada. Se requiere un mayor monitoreo y análisis para identificar áreas problemáticas [28].

3.2.2. Presencia de ^{210}Po en alimentos marinos

En la revisión se encontraron 33 artículos específicos para alimentos provenientes de mar, como mejillones, moluscos, mariscos, peces y algas. De acuerdo con esta información, se puede afirmar que hay dos fuentes principales de contaminación por radioisótopos en el medio marino: 1) las naturales, debido a las series de descomposición del ^{238}U y ^{232}Th , y 2) las artificiales, por series de descomposición del ^{137}Cs , ^{240}Pu o ^{90}Sr . Estos radionúclidos se bioacumulan en los tejidos duros y blandos de los organismos marinos, unos en mayor medida que otros (figura 10). El ^{210}Po tiene gran afinidad

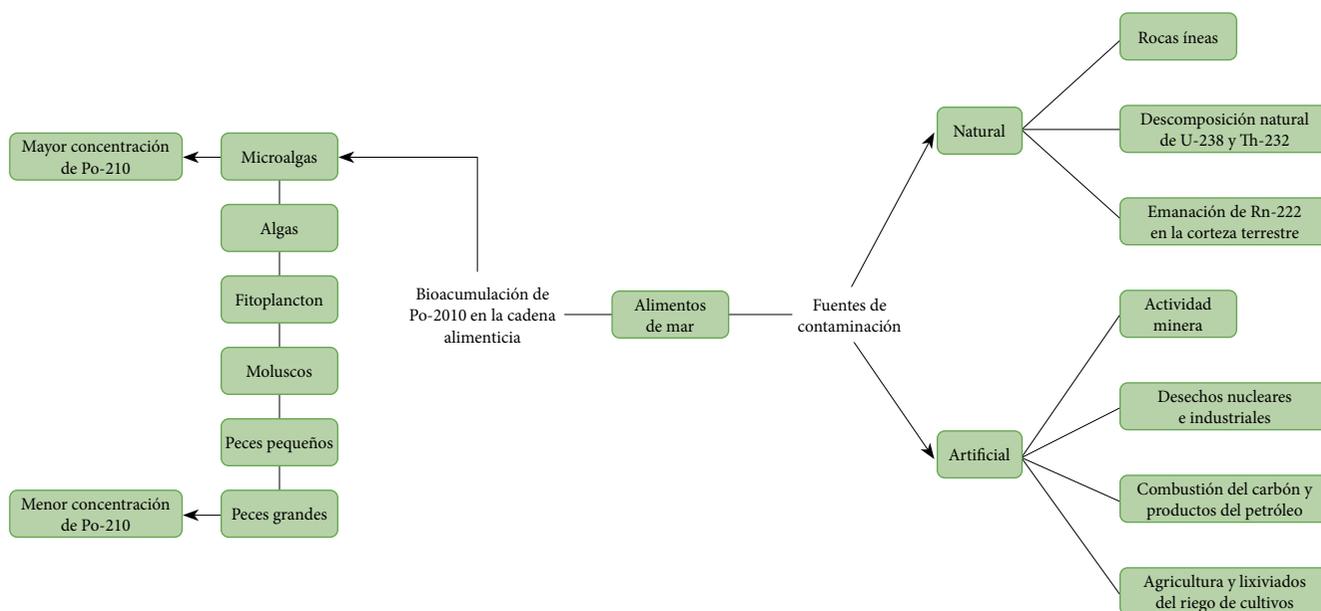


Figura 10. Esquema sobre contaminación de alimentos provenientes del mar por ^{210}Po

con tejidos blandos, pues forman enlaces de tipo -SH con las proteínas presentes en estos tejidos y no logra ser excretado [29], permaneciendo por largos periodos en este tejido. En animales marinos, no se ha logrado estimar un tiempo medio; en humanos se pudo determinar que tiene un periodo de acumulación en tejidos blandos de 50 días aproximadamente [30]. Es importante mencionar que, de acuerdo con los artículos analizados, estos animales bioacumulan en mayor proporción el ²¹⁰Po por el medio en el que viven, pues en el mar se depositan todos los desechos industriales e incluso desechos nucleares, que aumentan la probabilidad de mayores concentraciones de radionúclidos.

Adicionalmente, se ha determinado que en el hábitat de los crustáceos hay minerales arcillosos y materia orgánica que tiene la capacidad de depositar el ²¹⁰Po [31], y que contribuye a la dosis efectiva recibida, siendo importante conocer la dosis efectiva recibida por estos animales, ya que en su cuerpo existen tejidos que pueden ser más radiosensibles que otros, por tanto, la probabilidad de acumulación de ²¹⁰Po es mayor [32]. En consecuencia, los radionúclidos entran en la cadena alimentaria humana a través del consumo de alimentos marinos, por lo que evaluar la dosis de radiación en organismos marinos es esencial para calcular la probabilidad de que los radionúclidos lleguen al hombre por medio de la ingesta de esos alimentos [20]. Estos estudios concuerdan en que, al analizar las muestras de los animales marinos, las concentraciones de ²¹⁰Po bioacumuladas se localizaron en tejido comestible, branquias, sistema digestivo, hígado y materia fecal [33], [34].

En la mayoría de los artículos revisados se evidenció que el mejillón es la especie marina que más bioacumula ²¹⁰Po [20]. Estos animales se han utilizado como indicadores biológicos de contaminación por metales en el medio marino, pues viven sobre rocas marinas y se encuentran en regiones intermareales, principalmente [2]. Además, el mejillón ingiere detritus y fitoplancton, que tiene un alto grado de asociación y acumulación de radionúclidos, metales tóxicos y contaminantes orgánicos (hidrocarburos de petróleo y pesticidas), que resultan útiles para evaluar la contaminación y la ecotoxicología de cualquier región marina [30].

Otro de los alimentos de mar que en los últimos años se ha analizado con mayor auge, sobre todo en la cocina asiática y europea, son las algas, en las cuales se ha evidenciado la presencia y la movilidad del elemento radiactivo natural

²¹⁰Po [35]. De acuerdo con los diferentes estudios sobre las algas, se determinó que su capacidad de acumulación de ²¹⁰Po contribuye a establecer las condiciones para diferentes especies y a brindar información sobre la tolerancia de individuos a los mismos tipos de contaminantes en una zona ecológica. También, se demostró que algunas especies acumulan selectivamente ciertos elementos radiactivos en sus tejidos; por ejemplo, las macroalgas marrones *Cystosteria crinita* acumulan selectivamente ⁹⁰Sr, mientras que las *Wakame* acumulan ²¹⁰Po [36].

Al encontrar niveles elevados de ²¹⁰Po en la mayoría de la biota marina, los seres humanos podrían recibir una dosis de radiación por el consumo de dichos alimentos. Como resultado, se han realizado investigaciones para obtener mediciones de línea base de concentraciones de ²¹⁰Po en la biota marina y agua de mar para comprender mejor los procesos de absorción, bioacumulación y movilización en el medio marino [33].

3.2.3. Presencia de ²¹⁰Po en hortalizas, plantas medicinales y vegetales

Se encontraron 14 artículos para hortalizas, plantas medicinales y vegetales. El transporte de radionúclidos a través del suelo, la absorción de las plantas a través de sus raíces y, luego, a la comida conduce a la absorción de elementos radiactivos por el ser humano [37], [38]. Los radioisótopos pueden llegar a las plantas por contaminación externa, la cual se da en hojas y tallo, debido a la deposición de partículas presentes en el aire o por el constante bombardeo de rayos cósmicos a la Tierra, que interactúan con los radionúclidos atmosféricos y permiten su deposición. La contaminación interna se da a través de la raíz, pues la planta al absorber agua y nutrientes también absorbe radioisótopos presentes en el suelo, debido a suelos contaminados o lixiviados presentes allí [39], luego se ubica en diferentes partes de la planta dependiendo del metabolismo y su condición de crecimiento [37], [38], [40].

Las principales fuentes de contaminación para estos alimentos son el uso de fertilizantes fosfatados que tienen un alto impacto en la agricultura, pues favorecen la producción de cultivos y mejoran las propiedades de las tierras deficientes en nutrientes, ver figura 11. Las rocas de fosfato, materia prima para la elaboración de fertilizantes, contienen una alta concentración de ²³⁸U y ²²⁶Ra y sus productos de descompo-

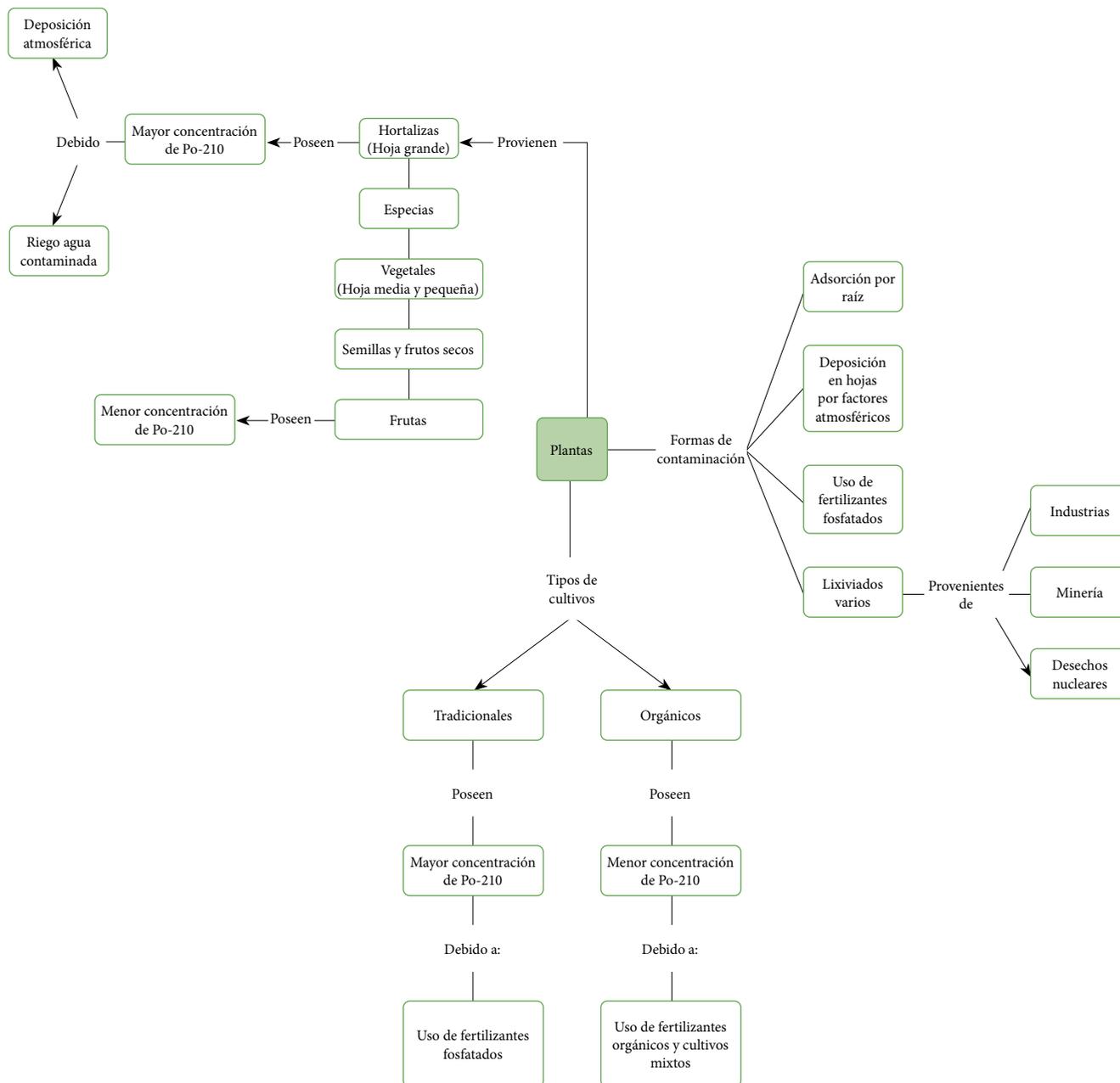


Figura 11. Esquema sobre contaminación hortalizas, vegetales y frutos por ²¹⁰Po

sición, debido a la acumulación de uranio disuelto durante su formación [37], [41].

De acuerdo con varios artículos [27], [42], [43], la dosis efectiva en humanos por el consumo de hortalizas, plantas medicinales, vegetales y frutos no supera la establecida por la OMS que es de 1,26 mSv año⁻¹ [44], de lo que se infiere que al estar las dosis dentro del límite máximo para el agua estándar de calidad no presentan un riesgo para la salud humana [45]. En los últimos años, la importancia de los métodos de

agricultura ecológica ha aumentado debido al creciente interés del consumidor en productos orgánicos certificados, pues se ha logrado determinar que existe una diferenciación en la actividad de ²¹⁰Po en muestras de alimentos de tipo vegetal recogidos de una granja o cultivo convencional, y los de una muestra de alimento recogida en una granja orgánica [46], [47]. Se encontró que los alimentos recolectados en las granjas convencionales poseen mayor concentración de este radionúclido, en comparación con las muestras recolectadas

en granjas ecológicas; esto se atribuye a los cuidados en el cultivo de dichos alimentos, pues en los alimentos cultivados en granjas convencionales se emplean muchos fertilizantes fosfatados para aumentar la productividad, lo cual genera que los radionúclidos se transfieran del fertilizante a los alimentos a través del suelo, mientras que en la agricultura orgánica se usan fertilizantes orgánicos, como el estiércol bovino [48], [49], [43].

3.2.4. Presencia de ²¹⁰Po en alimentos de origen animal

En la revisión se encontraron 6 artículos específicos para alimentos provenientes de animales como bovinos, escarabajos, focas, aves marinas y varios mamíferos. Se ha determinado que los animales al ingerir plantas, aguas o animales contaminados con este radionúclido tienden a bioacumular el ²¹⁰Po, pues, aunque este es excretado fácilmente debido a su solubilidad, es afín con varios tejidos de los animales [50]. De acuerdo con los estudios se logró identificar que la mayor concentración de ²¹⁰Po en alimentos provenientes de animales se encontró en el hígado y músculo del animal, productos comestibles por humanos en grandes proporciones. Es de resaltar que para alimentos de fuente animal no se han realizado muchos estudios para la identificación de este radionúclido, pues al no encontrarse altas cantidades de ²¹⁰Po no se ha visto la necesidad de realizar un monitoreo específico para organismos terrestres como mamíferos. La mayoría de los estudios se han adelantado en lugares en los que se tiene sospecha de contaminación por radionúclidos, ya sea porque las zonas han estado expuestas a pruebas o accidentes nucleares, lixiviación de desechos de plantas nucleares, plantas de fertilizantes fosfatados o minería [51].

El uranio puede ingresar al cuerpo del animal por la ingestión de agua y comida contaminada, así como por inhalación de radionúclidos. Cuando el uranio ingresa al cuerpo, se distribuye entre los órganos y tejidos, o son excretados dependiendo de la vía de exposición, la forma química en la que ingresó el radionúclido, características físicas (tamaño de partícula) y órgano del cuerpo en que se acumuló [52]. En correspondencia con los resultados de las diferentes investigaciones, se logró determinar que los alimentos provenientes de animales no representan un porcentaje significativo en la dosis efectiva anual de radiactividad

para humanos, pues no superan los valores permitidos por la OMS [50].

3.2.5. Presencia de ²¹⁰Po en fórmula infantil

Las fórmulas infantiles son un sustituto artificial de la leche materna. En la revisión se encontraron cinco artículos específicos para la determinación del ²¹⁰Po en este tipo de alimentos, en los cuales la presencia de este radionúclido se atribuye al uso de rocas fosfatadas y cálcicas, conchas de moluscos como materia prima para su elaboración, pues la industria de estos suplementos extrae minerales como el carbonato de calcio o el citrato de calcio, en los cuales quedan trazas de radionúclidos que no se logran eliminar de dichos minerales [53], [54].

En el caso de los bebés, el camino principal de su ingesta es por fórmulas infantiles comercializadas, que son las únicas fuentes de alimentación por lo menos hasta el sexto mes de edad. Según los autores, el consumo de estas fórmulas por recomendaciones dietéticas conduciría a una dosis efectiva anual de 40 a 800 $\mu\text{Sv a}^{-1}$ [55], la cual no supera la recomendada por el OIEA; por tanto, las muestras de suplementos alimenticios y de calcio estudiados no son inocuos para la comunidad. Sin embargo, es necesario realizar un monitoreo continuo, pues la materia prima para la elaboración de estos suplementos posee altas concentraciones de radionúclidos [35], [53] y los bebés son el grupo de población más radiosensible, pues se caracterizan por la absorción intestinal más alta asociada al umbral más bajo de efectos adversos. Además, el primer año de vida es un periodo muy sensible ya que se está generando el desarrollo del sistema nervioso, reproductivo, digestivo y respiratorio [35]. De acuerdo con [55], la principal contribución a la estimación de la dosis acumulada para lactantes se origina en ²¹⁰Po (66-86 %) y ²³⁰Th (14-34 %), mientras que la contribución de los radioisótopos de uranio es insignificante. Los resultados muestran que el ²¹⁰Po y ²³⁰Th son responsables de más del 99 % de la dosis acumulada anual combinada (230 a 350 $\mu\text{Sv a}^{-1}$) [55].

3.2.6. Presencia de ²¹⁰Po en diversos alimentos

En la revisión se encontraron 7 artículos para alimentos varios, como miel, aceites esenciales y dieta combinada; en 2 se describe el monitoreo realizado en miel en Italia y en Polonia; en uno el monitoreo en aceites esenciales, y los

otros 4 describen el seguimiento realizado en dieta compuesta [56]. En estos últimos, la metodología incluyó el secado y pulverizado de una comida del día completa (desayuno, almuerzo o cena), cuantificando la concentración de ^{210}Po en general. En ninguno de los artículos se encontró que la dosis efectiva anual superara la recomendada por la OMS para los seres humanos, por lo cual no se recomienda realizar un monitoreo constante. La concentración de ^{210}Po en cereales, legumbres, alimentos de origen animal, vegetales y especias recogidas está en el rango de $504\text{m Bq/kg}^{-1} \pm 61$ [57], [58]. El consumo de peces marinos y de agua dulce contribuye al 32,35 % de la dosis de ingestión total recibida; el agua, al 28,35 %; los cereales, al 13,4 %; las hortalizas, al 9,8 %; las especias, al 6,5 %; los alimentos proteicos y las legumbres, al 4,8 % [59], [60], [61]. Cabe resaltar que en uno de los estudios se realizó una comparación entre la dieta de una persona vegetariana y otra que se alimenta normalmente, llegando a la conclusión que la dosis efectiva aportada por ^{210}Po es mayor en la persona que come alimentos fuente de animales que la persona vegetariana, pues los alimentos provenientes del mar aportan una alta dosis efectiva a sus consumidores [57], [62].

3.3. Metodología de análisis de ^{210}Po en agua y alimentos

En cuanto a los métodos de cuantificación presentados en los diferentes artículos analizados, se recopiló la información respecto a la espectrometría alfa, que es el método más utilizado para la detección del isótopo ^{210}Po . Dicha técnica radiométrica consiste en mediciones de las fuentes obtenidas por deposición espontánea de radionúclidos y se basa en la medida de las partículas alfa que llegan a un detector situado en una cámara sometida a vacío. Cuando las partículas alfa llegan al detector, se produce una señal electrónica que es captada por un analizador multicanal, que genera un espectro digital en el que se reparten las partículas detectadas en función de su energía. Este espectro es analizado y representado con el *software* adecuado en un ordenador [55], [2].

Para la determinación de ^{238}U y ^{210}Po en las muestras de dieta por espectrometría alfa es necesario como paso previo un proceso de digestión. Para ello se recomienda usar un microondas [63], pues en este equipo se logra trabajar bajo condiciones de temperatura y presión controladas, lo

cual evitará que algún gas o elemento volátil escape, llevando consigo el ^{210}Po . Para el proceso de digestión, las muestras de dieta deben estar secas y pulverizadas [9], [64].

El proceso de digestión se realiza partiendo de una cantidad de muestras (en muestras de agua no es necesario realizar este paso preliminar), donde se supone que están presentes los radionúclidos; con este proceso se logra la coprecipitación de actínidos y ^{210}Po , que tiene como objetivo ayudar a la concentración de los isótopos de interés. Luego se efectúa la etapa de separación y aislamiento de ^{238}U y ^{210}Po mediante la técnica de extracción-solvente y, por último, la fracción de ^{238}U se electrodeposita, mientras que la de ^{210}Po se autodeposita para obtener fuentes adecuadas de medida [9].

A la muestra de dieta seca y molida se le adicionan 6 ml de ácido nítrico al 65 %, 1 ml de peróxido de hidrógeno al 25 % y 1 ml de ácido clorhídrico al 35 %, se programa el microondas a una potencia de 800W durante 20 minutos, y una vez finalizado el proceso, se vierte el contenido en un vaso y se lleva mediante evaporación a 10 ml, adicionando 40 ml de agua destilada. Posteriormente, la disolución es sometida a precipitación, para lo cual se adicionan 5 ml de hidróxido de hierro (III) en medio básico (amoníaco) para provocar la coprecipitación, y se procede a separar el precipitado de la fase acuosa, empleando la centrifugación (10 minutos a 4000 r. p. m.). Una vez se ha eliminado el sobrenadante, se añade ácido nítrico 8 M (molar) para disolver el precipitado; en este paso se supone que los isótopos se encuentran en la disolución y se procede a extraer selectivamente los radionúclidos de la disolución, empleando la técnica de extracción-solvente.

El solvente orgánico empleado es el tributil-n-fosfato (TBP) para aislar los isótopos de ^{238}U y ^{210}Po . El ^{210}Po tiende a autodepositarse en superficies metálicas de elementos con un potencial *redox* inferior al suyo y se eligen placas de níquel o de plata para dicha autodeposición. En el montaje de autodeposición se debe tener un agitador magnético, un medio ácido con ácido clorhídrico 1,5 M y la lámina del metal debe estar en un sistema tipo aro, a una temperatura de 80 °C y durante un tiempo mínimo de 4 horas. Después, se lleva al equipo de espectrometría alfa donde se obtiene un espectro con el cual se determina la cantidad de ^{210}Po presente en las muestras [9], [63], [64].

3.3.1. Diagrama de flujo de la metodología de análisis de ²¹⁰Po en agua y alimentos

El procedimiento recopilado de los diferentes artículos se presenta en la figura 12 con el propósito de que sirva como base para futuros estudios.

4. Conclusiones

Al realizar la revisión del estado del arte de las investigaciones sobre la presencia de ²¹⁰Po en alimentos y agua en el mundo en el periodo 2014-2019, se evidenció que la base

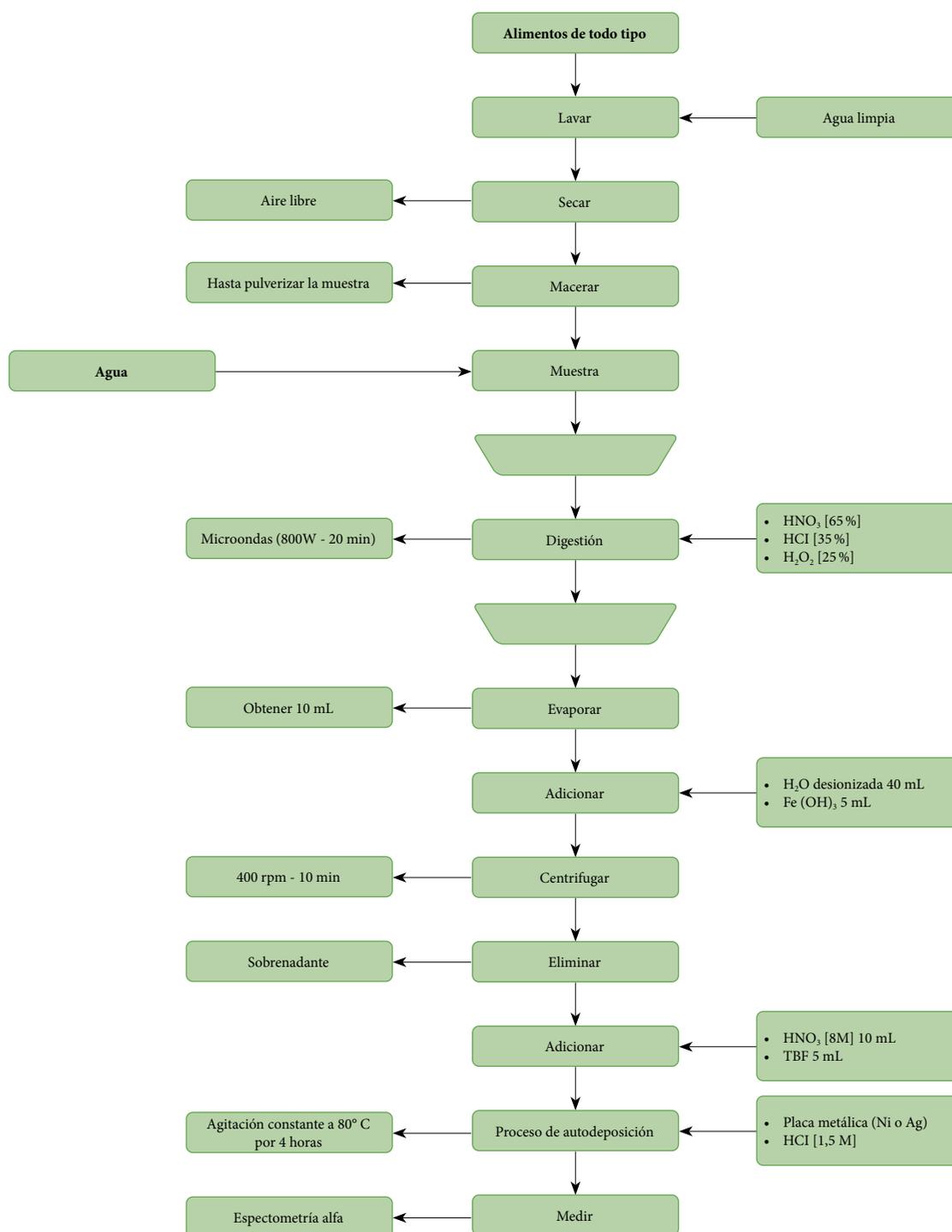


Figura 12. Diagrama de flujo del método de cuantificación del ²¹⁰Po en alimentos

de datos con mayor número de artículos es ScienceDirect y la revista con más publicaciones es *Journal of Environmental Radioactivity*, siendo el 2018 el año con más publicaciones sobre el tema. El continente que más investigaciones realizó fue Europa, y los países que más publicaron fueron Polonia e India.

El análisis de los artículos permitió identificar las diferentes formas de contaminación del ^{210}Po en agua, cuya concentración varía de $0,7 \text{ mBq L}^{-1} \pm 0,1$ a $5,0 \text{ mBq L}^{-1} \pm 0,7$ y de $0,83 \text{ mBq L}^{-1} \pm 0,12$ a $5,2 \text{ mBq L}^{-1} \pm 0,8$ en muestras de agua de río y pozos de perforación, respectivamente, y en alimentos varía considerablemente según el grupo alimenticio estudiado. Las fuentes de contaminación por este radionúclido, tanto en agua como en alimentos son similares, lo que varía es la forma en la que llega. En agua, se debe a la presencia de rocas sedimentarias, siendo una forma de contaminación natural. La contaminación de esta matriz también se le atribuye al vertimiento de desechos de plantas nucleares o de la industria de fertilizantes fosfatados. En vegetales y hortalizas, la contaminación por este radionúclido se debe también al uso de fertilizantes fosfatados que, por su composición química, contribuyen a la deposición de radionúclidos en el suelo y a partir de este la planta lo absorbe.

De acuerdo con la información analizada, se concluye que la intensidad de la ingesta de ^{210}Po depende del lugar de residencia, la cantidad de contaminación local, los hábitos alimenticios y el origen de los alimentos, donde aquellos de mayor bioacumulación de ^{210}Po son los provenientes de la biota marina.

La presencia de ^{210}Po en fórmulas infantiles, que deben ser ricas en calcio, se debe a que la materia prima para su producción incluye rocas de apatita, que contienen radionúclidos.

En cuanto a determinación y cuantificación de ^{210}Po en alimentos y agua, se identificó y organizó una metodología estándar para el tratamiento de las muestras, la cual comprende su recolección, secado y pulverización, la digestión por medio de microondas para evitar la pérdida de compuestos volátiles a cuantificar [63], algunos procesos químicos que permitan la autodeposición del ^{210}Po y, por último, la cuantificación por espectrometría alfa. En todos los artículos se presentaba la misma metodología con algunas variantes, con la cuales se buscaba optimizar el método.

Es importante monitorear los alimentos y agua para la determinación y cuantificación de elementos radiactivos en Colombia, teniendo en cuenta que un gran porcentaje de la dosis total de radiación recibida por el público en general proviene de fuentes de radiación naturales. Por tanto, es importante tener conocimiento sobre la concentración de ^{210}Po , específicamente en los alimentos provenientes del mar y de las matrices acuáticas, dada la riqueza hídrica del país.

Referencias

- [1] R. Chauhan y A. Kumar, "Soil to plant transfer of alpha activity in potato plants: impact of phosphate fertilizers", *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 13, 2015. <https://doi.org/10.1186/s40201-015-0200-4>
- [2] G. Bjorklund, A. Christophersen, S. Chirumbolo, O. Selinus y J. Aaseth, "Recent aspects of uranium toxicology in medical geology", *Environmental Research*, n.º 156, pp. 526-533, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.04.010>
- [3] J. Guzmán, *Nucleónica básica*, Bogotá: Instituto de Asuntos Nucleares, pp. 30-60, 1989.
- [4] S. Annamalai, K. Arunachalam y R. Selvaraj, "Natural radionuclide dose and lifetime cancer risk due to ingestion of fish and water from freshwater reservoirs near the proposed uranium mining site", *Environmental Science and Pollution Research*, n.º 24, pp. 15427-15443, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9111-5>
- [5] R. Seiler, " ^{210}Po in drinking water, its potential health effects, and inadequacy of the gross alpha activity MCL", *Science of The Total Environment*, vol. 568, pp. 526-532, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.044>
- [6] B. Dickson y K. Scott, "Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors", *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, n.º 17, pp. 187-200, 1997.
- [7] N. R. Barbosa, "Presencia de polonio-210 (^{210}Po) en alimentos y agua potable: una revisión", tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2019.
- [8] M. Ahmed, L. Alam, C. Mohamed, M. Mokhtar y G. Ta, "Health Risk of Polonium 210 Ingestion via Drinking Water: An Experience of Malaysia", *Journal of Environmental and Public Health*, vol. 15, n.º 10, pp. 456-468, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102056>

- [9] I. Díaz, “El polonio 210 en la cadena alimenticia humana”, *Rev. Radio Protección*, vol. 18, pp. 42-50, 2018.
- [10] J. Aparecida, R. García, D. Banotto, I. Díaz y J. Motta, “Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by U-rich coal mining activities in Brazil”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 177, pp. 37-47, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001>
- [11] UNSCEAR, *Sources and effects of ionizing radiation*, Nueva York: United Nations, vol. 1, pp. 1-18, 2008.
- [12] M. M. Spencer-Lopes, B. P. Forster y L. Jankuloski, Eds., *Manual on Mutation Breeding*, 3.^a ed. Viena: FAO/IAEA, 2018.
- [13] R. Gjelsvik, E. Holm, J. Kålås, B. Persson y J. Åsbrink, “Polonium-210 and Cesium-137 in lynx (*Lynx lynx*), wolverine (*Gulo gulo*) and wolves (*Canis lupus*)”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 138, pp. 1-8, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.026>
- [14] A. Porras y J. Díaz, “The uranium as an energetic resource and its currently mining in Colombia”, *DYNA*, vol. 86, n.º 208, pp. 362-367, 2019.
- [15] J. Bueno, Yacimientos de uranio y otros metales en la región de La Baja, Municipio de California, Departamento de Santander, *Boletín Geológico*, n.º 1143, pp. 1-116, 1955.
- [16] G. Prieto, C. L. Guatame y S. C. Cárdenas, comps. *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano, 2019.
- [17] A. Benés y E. Gadea, *Reglamento de protección sanitaria contra radiaciones ionizantes*. Madrid: Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales España, 2001.
- [18] G. Urrútia y X. Bonfill, “PRISMA declaration: A proposal to improve the publication of systematic reviews and meta-analyses”, *Medicina Clínica*, vol. 135, pp. 507-511, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- [19] IAEA, “Japan’s Reports on Conditions at TEPCO’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Station”, 2016, Jun 3. Disponible en <https://www.iaea.org/newscenter>
- [20] K. Feroz, W. Godwin y M. Rajan, “Polonium-210 in marine mussels (bivalve molluscs) inhabiting the southern coast of India”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 138, pp. 410-416, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.023>
- [21] E. Kavitha y L. Paramesh, “Estimation of U, ²²⁶Ra, and ²¹⁰Po Concentrations in Cauvery River Basin, South Interior Karnataka Region, India”, *Radiochemistry*, vol. 60, pp. 92-99, 2018. <https://doi.org/10.1134/S1066362218010149>
- [22] C. Bouvier, E. Bonthonneau, F. Dadache y F. Rebiere, “An alternative procedure for uranium analysis in drinking water using AQUALIX columns: Application to varied French bottled waters”, *Talanta*, vol. 118, pp. 180-185, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2013.10.010>
- [23] M. Walsh, G. Wallner y P. Jennings, “Radioactivity in drinking water supplies in Western Australia”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 130, pp. 56-62, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.12.016>
- [24] Organización Mundial de la Salud, *Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice*. vol. 1: Recomendaciones. Tercera edición, pp. 173-182. https://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_es_9_fig.pdf
- [25] E. Fonollosa, A. Peñalver, C. Aguilar y F. Borrull, “Polonium-210 levels in different environmental samples”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 22, n.º 24, pp. 20032-20040, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5158-3>
- [26] I. Sekudewicz y M. Gasiorowski, “Determination of the activity and the average annual dose of absorbed uranium and polonium in drinking water from Warsaw”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 319, pp. 1351-1358, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6351-x>
- [27] T. Tran *et al.* “Estimation of radionuclide concentrations and average annual committed effective dose due to ingestion for the population in the Red River Delta, Vietnam”, *Environmental Management*, vol. 63, pp. 444-454, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00267-018-1007-8>
- [28] J. Faganeli, I. Falnoga, L. Benedik, Z. Jeran y K. Klun, “Accumulation of ²¹⁰Po in coastal waters (Gulf of Trieste, northern Adriatic Sea)”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 174, pp. 38-44, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.07.018>
- [29] E. Aslan *et al.*, “An investigation on the seasonal variations of the biomarkers of oxidative stress response and their correlations to Polonium-210 in mussel (*Mytilus galloprovincialis*) and common sole (*Solea solea*) from İzmir Bay, Turkey”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 189, pp. 103-108, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.03.018>

- [30] Ö. Kılıç, M. Belivermiş, O. Gönülal, N. Sezer y F. P. Carvalho, “ ^{210}Po and ^{210}Pb in fish from northern Aegean Sea and radiation dose to fish consumers”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 318, n.º 2, pp. 1189-1199, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6216-3>
- [31] A. Tejera, L. Pérez, G. Guerra, A. C. Arriola-Velásquez, H. Alonso, M. A. Arnedo, G. Rubiano y P. Martel, “Natural radioactivity in algae arrivals on the Canary coast and dosimetry assessment”, *Science of The Total Environment*, vol. 658, pp. 122-131, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.140>
- [32] V. Peña, “Método de evaluación de dosis por ingestión de polonio, bismuto y plomo como materiales radiactivos naturales”, Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [33] S. Uddin, S. Fowler, M. Behbehani y M. Metian, “ ^{210}Po bioaccumulation and trophic transfer in marine food chains in the northern Arabian Gulf”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 174, pp. 23-29, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.08.021>
- [34] D. Desideri, M. Meli, C. Roselli, L. Feduzi y L. Ugolini, “ ^{210}Po bioaccessibility assessment in algae for human consumption: An in vitro gastrointestinal digestion method”, *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, vol. 80, n.º 4, pp. 230-235, 2017. <https://doi.org/10.1080/15287394.2017.1285733>
- [35] D. Desideri *et al.*, “Assessment of radioactivity in Italian baby food”, *Food Chemistry*, vol. 279, pp. 1-27, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.030>
- [36] N. Tzvetana y T. Zornitza, “ ^{90}Sr , ^{210}Pb , ^{210}Po and ^{222}Ra isotopes in marine macroalgae and mussel *Mytilus galloprovincialis* from the Bulgarian Black Sea zone”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 307, n.º 2, pp. 1183-1194, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4502-x>
- [37] P. Chauhan y R. Chauhan, “Measurement of fertilizers induced radioactivity in tobacco plants and elemental analysis using ICAP–AES”, *Radiation Measurements*, vol. 63, pp. 6-11, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2014.02.006>
- [38] M. Al-Masri, Y. Amin, S. Ibrahim y M. Nassri, “Transfer of ^{210}Po , ^{210}Pb and ^{238}U from some medicinal plants to them essential oils”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 141, pp. 51-56, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.11.021>
- [39] E. Rodríguez, M. McLaughlin y D. Pennock, *Soil Pollution: a hidden reality*, Roma: FAO, 2018.
- [40] R. Mingote y R. Nogueira, “The use of statistical methods for censored data to evaluate the activity concentration of Po-210 in beans (*Phaseolus vulgaris* L.)”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vols. 162-163, pp. 160-165, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.05.018>
- [41] FAO, *Proceedings of the Global Symposium on Soil Pollution*. Roma, 2018.
- [42] V. Taavi, J. Loosaar, F. Gyakwaa *et al.*, “Pb-210 and Po-210 atmospheric releases via fly ash from oil shale-fired power plants”, *Environmental Pollution*, vol. 222, pp. 210-218, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.054>
- [43] O. Samad, M. Aoun, B. Nsouli, G. Khalaf y M. Hamze, “Investigation of the radiological impact on the coastal environment surrounding a fertilizer plant”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 133, pp. 69-74, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.05.009>
- [44] D. Strumińska-Parulska y G. Olszewski, “Is ecological food also radioecological? – Po and Pb studies”, *Chemosphere*, vol. 191, pp. 190-195, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.051>
- [45] K. Szymańska, D. Strumińska-Parulska y J. Falandysz, “Isotopes of ^{210}Po and ^{210}Pb in Hazel bolete (*Leccinellum pseudoscabrum*) bioconcentration, distribution and related dose assessment”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, pp. 904-912, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05376-8>
- [46] J. Galhardi, R. García, D. Bonotto, I. Díaz y J. Motta, “Natural radionuclides in plants, soils and sediments affected by Urich coal mining activities in Brazil”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 177, pp. 37-47, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.06.001>
- [47] G. Olszewski *et al.*, “On the extraction efficiency of highly radiotoxic ^{210}Po in Polish herbal teas and possible related dose assessment”, *Microchemical Journal*, vol. 144, pp. 431-435, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.10.005>
- [48] M. Bakım y A. Gorgun, “Radioactivity in soils and some terrestrial foodstuffs from organic and conventional farming areas in Izmir, Turkey”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 306, n.º 1, pp. 237-242, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4009-5>

- [49] E. Puchkova y O. Bogdanova, “²¹⁰Po in black and green teas”, *Radiochemistry*, vol. 58, n.º 1, pp. 98-105, 2016. <https://doi.org/10.1134/S1066362216010161>
- [50] J. Godoy *et al.*, “²¹⁰Po and ²¹⁰Pb content of marine birds from Southeastern Brazil”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 135, pp. 108-112, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.04.008>
- [51] T. Ciesielski, M. Góral, P. Szefer, B. M. Jenssen y R. Bojanowski, “¹³⁷Cs, ⁴⁰K and ²¹⁰Po in marine mammals from the southern Baltic Sea”, *Marine Pollution Bulletin*, vol. 101, n.º 1, pp. 81-88, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.052>
- [52] A. Walencik-Łata *et al.*, “The study of natural and artificial radionuclides incorporation in teeth and head bones of animals lived nearby Caetite uranium mine, Brazil”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vols. 162-163, pp. 39-44, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.04.037>
- [53] R. K. Prabath, S. R. Sreejith, M. G. Nair, D. D. Rao y K. S. Pradeepkumar, “Determination of ²¹⁰Po concentration in commercially available infant formulae and assessment of daily ingestion dose”, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, vol. 8, n.º 3, pp. 470-476, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2015.05.002>
- [54] M. Lima, C. Alves y J. Sanjurjo, “Gamma radiation in rocks used as building materials: The Braga granite (Nw Portugal)”, *Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe. Revista de Xeoloxía Galega e do Hercínico Peninsular*, vol. 38, pp. 79-92, 2015. <https://doi.org/10.17979/cadlaxe.2015.38.0.3684>
- [55] M. Trdin y L. Benedik, “Uranium, polonium and thorium in infant formulas (powder milk) and assessment of a cumulative ingestion dose”, *Journal of Food Composition and Analysis*, vol. 64, pp. 198-202, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2017.09.005>
- [56] A. Borylo, G. Romańczyk, J. Wiczorek, D. Strumińska-Parulska y M. Kaczor, “Radioactivity of honey from northern Poland”, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 319, n.º 1, pp. 289-296, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6343-x>
- [57] R. Sivakumar, “An assessment of the ²¹⁰Po ingestion dose due to the consumption of agricultural, marine, fresh water and forest foodstuffs in Gudalore (India)”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 137, pp. 96-104, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.06.019>
- [58] S. Hurtado, J. Bermúdez y M. Villa, “A sequential determination of ⁹⁰Sr and ²¹⁰Po in food samples”, *Food Chemistry*, vol. 229, pp. 159-164, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.02.077>
- [59] F. Carvalho, J. Oliveira y M. Malta, “Intake of Radionuclides with the Diet in Uranium Mining Areas”, *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 8, pp. 43-47, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2014.05.010>
- [60] D. Strumińska-Parulska, K. Szymańska, G. Krasińska, B. Skwarzec y J. Falandysz, “Determination of ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in red-capped scaber (*Leccinum aurantiacum*): bioconcentration and possible related dose assessment”, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 23, pp. 22603-22613, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7473-8>
- [61] J. Chen, W. Zhang, B. Sadi, X. Wang y D. C. G. Muir, “Activity concentration measurements of selected radionuclides in seals from Canadian Arctic”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 169-170, pp. 48-55, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.12.015>
- [62] E. Strady *et al.*, “²¹⁰Po and ²¹⁰Pb trophic transfer within the phytoplankton-zooplankton-anchovy/sardine food web: a case study from the Gulf of Lion (NW Mediterranean Sea)”, *Journal of Environmental Radioactivity*, pp. 141-151, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.019>
- [63] C. Henricsson, Y. Ranebo, M. Hansson, C. L. Rääf y E. Holm, “A biokinetic study of ²⁰⁹Po in man”, *Science of The Total Environment*, vol. 437, pp. 384-389, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.080>
- [64] K. Stark *et al.*, “Dose assessment in environmental radiological protection: State of the art and perspectives”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vols. 175-176, pp. 105-114, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.05.001>